

エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の課題

令和4年7月1日
資源エネルギー庁

1. 革新炉開発の課題の整理

- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④革新炉開発の体制の整備
- ⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

1－1．第1回・第2回 革新炉ワーキンググループでの主なご意見①

開発の方向性・時間軸

- 原子力の必要な規模等は不明瞭であり、事業者が投資していくには不十分な状態。国が原子力技術の開発を支援するにあたっては、国の目標と整合しており公益性が高いことを示すことも重要。革新炉開発において、長期的なビジョン、具体目標の設定が重要。
- 成熟した信頼性の高い技術をベースに、安全性・コストパフォーマンスの追求、発電以外の用途にも使える新しい技術を追求していくことはどちらも重要。革新炉開発を検討するに当たっては、ユーザーの視点を踏まえつつ、具体的なニーズを把握し、2050年カーボンニュートラル実現を踏まえた時間軸やリソースを勘案しつつ、開発に優先順位を付けることが必要。
- 原子力の産業、技術基盤の維持は重要である。地域経済や雇用への波及効果も期待できる。原子力サプライチェーンの脆弱化が進む中で、政府の新設方針を含む明確なメッセージが必要。
- CNに向けたエネルギー安全保障における革新炉の貢献の可能性は、炉型によって技術成熟度やこれまでの実績が異なるため時間軸を踏まえたアクションが必要。
- 評価基準について、プライオリティやタイムラインは考えていく必要がある。安全性の確保・向上は最も重要な評価軸となるのではないか。また、放射性廃棄物の最終処分を含むバックエンドへの対応も重要な評価軸。これらはすでに日本が直面している課題であり、我が国にとってのプライオリティは相当に高い。スピード感を持った取り組みが必要。

1－1．第1回・第2回 革新炉ワーキンググループでの主なご意見②

開発の方向性・時間軸

- TerraPowerは常に商用化を目指しており、研究開発で閉じては意味がない。米国の新型炉開発は、明らかに中露を意識した戦略と考える。一方、日本は、再稼働も進まず、先進国でありながら停電リスクの高い電力の需給問題にさらされている。原子力のイノベーションが重要であり、革新炉は当然のシナリオであるが、先にリプレースの政策決定がないと、革新炉の議論は空中分解してしまうことになりかねない。その議論を、資源エネルギー庁及びその他の政策立案者をお願いしたい。
- 原子力に関して、再稼働は当面の課題であるが、革新炉開発の観点では、いつの時点から社会実装されるかという予見性の整理が、重要な評価軸である。
- 2050年カーボンニュートラル目標を掲げているが、この時間軸で革新炉が一体どういう役割を果たすのかというところが非常に疑問。諸外国の状況を考えると、2030年時点で考えれば、革新炉はほぼ何の役に立たないことは明らか。また小型炉は、30万kW以下とされているが、日本国内で考えたときに2050年時点で、小型炉を一体何基建設できるのかというところも冷静に見るべき。

1－1．第1回・第2回 革新炉ワーキンググループでの主なご意見③

プロジェクト・予算・制度

- サプライヤーの人員・設備を維持できる事業規模があるということは、原子力事業の継続において不可欠な要素。世界の革新炉市場のどの程度を日本の企業が獲得することを目的とするのか、その市場規模を獲得する蓋然性を示すために、革新炉間のコンセプトの比較や同じ炉型内では企業間の比較のような競争力の分析が必要。
- エネルギー資源に乏しく欧州のような外国との系統連携もない日本では、リスクマネジメントの観点から原子力を含むバランスのいいエネルギーミックスが必要。ウクライナ情勢による新たな課題、2050年のCN、経済性の問題においても原子力は必須。欧米では革新炉の研究開発に大胆な支援措置が講じられている。日本でもNEXIPの支援があるがさらに踏み込んだ対応が求められる。
- 新型炉開発者がベンチャー企業として成立し得るのが米国の強み。一方、日本では巨大なグローバルのリスクマネーの流入が、あらゆるテクノロジー分野で期待しにくい。原子力はまさにそうである。そのため、政府支援の意味付けが大きく、そうすると社会の理解が非常に必要になると思う。
- ユーザーである事業者として、今後は設計や規制基準が国際的に共通化され、運用段階にも関わってくると思うため、ぜひとも開発段階から国際連携を進めていただきたい。
- 革新的軽水炉は実績があり、規制対応の予見性も高く、即応という点で期待できる。国が果たす役割として明確に戦略を示すことが重要。それがなければなかなか投資につながらない。

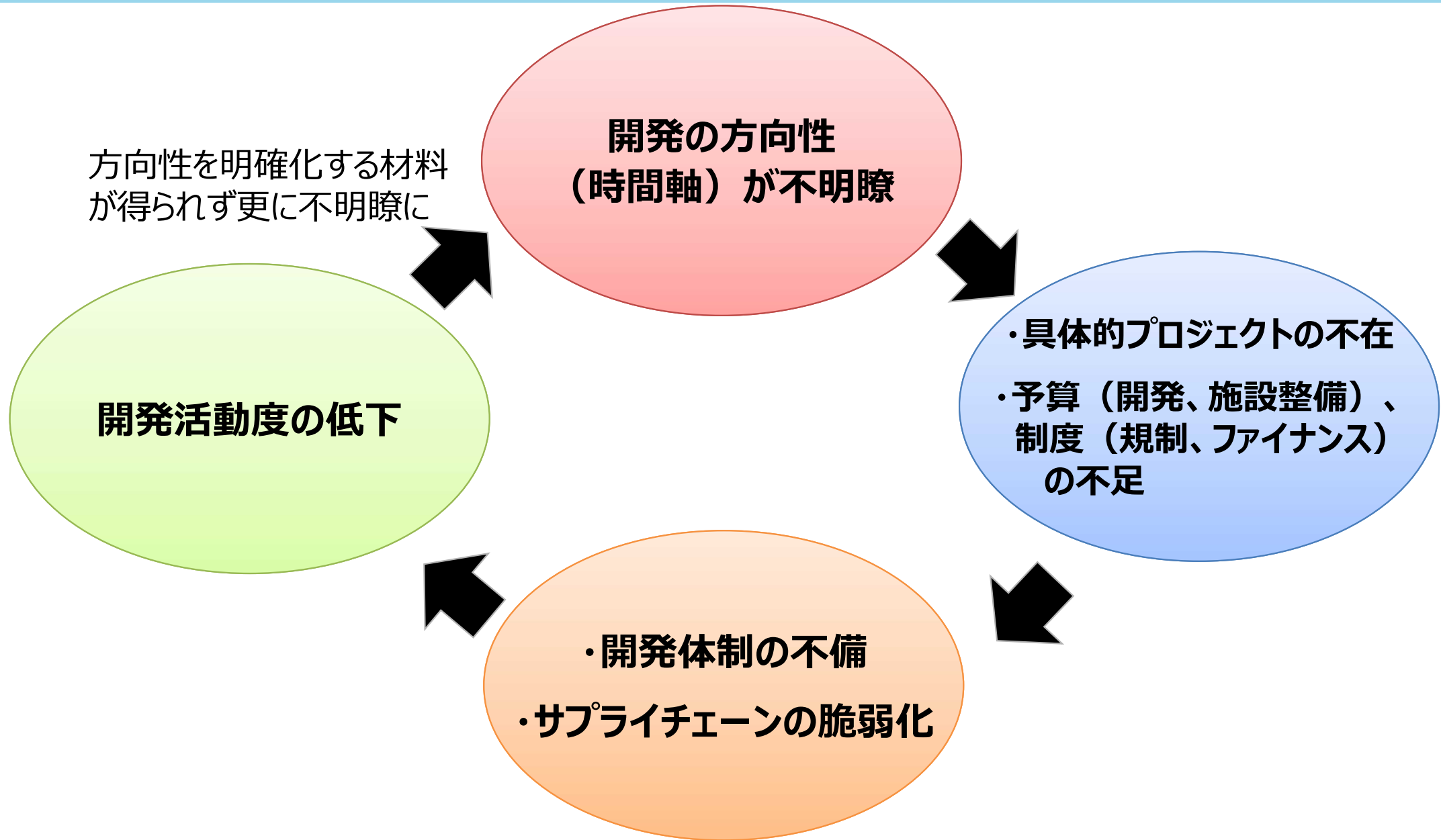
1－1．第1回・第2回 革新炉ワーキンググループでの主なご意見④

開発体制・サプライチェーン

- 産業構造を考慮すると、日本の目指す姿は、安定的で安価なエネルギー供給、技術自給率を高める、長期的な持続性の3つ。
技術の自給率には、サプライチェーンの維持や雇用が重要。リプレイスによってエネルギー産業が育ち、技術自給率が高まる。
- 時間軸を考慮して優先順位を付けて考えていく必要がある。軽水炉はある程度維持できると思うが、高速炉や高温ガス炉といった革新炉については、サプライチェーンはますます困難な状況になっている。こういった技術をどう維持していくのかという点についても議論すべき。
- 戦略的自律性について、アメリカがロシアからのウラン輸入を禁止し、国内の採掘や代替輸入先の検討を進めている。他国に過度に依存せずに燃料を確保できること、要素技術の成熟度、技術自給率に重みを置いて技術を選定することも必要。5月11日に経済安全保障推進法が成立し、サプライチェーン強靱化のための制度が整えられていくと思われるが、革新炉に対するサプライチェーン強靱化も重要。
- 日本の強みとして謳われていた大型軽水炉向け技術がどの程度求められているのか、しっかり見るべき。原発輸出を推し進めたときに先進的な日本の軽水炉技術を海外展開するなど主張されていたわけだが、相当国が力を入れて原発のパッケージ輸出を試みたにもかかわらず失敗してきたわけで、パーツの輸出にせよ、事業者の支援ではなくて、もう少し客観的な市場分析が必要。

1 - 2. 開発工程の悪循環

- 東電福島第一原発事故後、開発の方向性が不明瞭となったことから、具体的建設プロジェクトが喪失、開発体制やサプライチェーンが脆弱化し、さらに開発の方向性が不明瞭となる悪循環に陥っている。



1. 革新炉開発の課題の整理

①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化

②予算（開発、施設整備）の整備

③制度（規制、ファイナンス等）の整備

④革新炉開発の体制の整備

⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

①ー 1. 開発の方向性：米国（AP1000、NuScale）

- **AP1000**は中国で4基運転開始したほか、4基を建設中。エネルギー省(DOE)より**開発支援や運転・建設に向けて設計認証（DC）取得の支援**を受ける。
- **NuScale**は2026年までに米国での初号機PJの建設・運転認可を取得し、**2029年に運転開始予定**。**DOEが開発支援**を目的とした補助金を交付。

状況	AP1000	NuScale
政府支援	1992年より、新型炉の初号機建設支援プログラム「FOAKE」でABWRとAP600（AP1000の前身）が選定され、DOEより1億ドル(115億円)を支援、産業界より1.75億ドル(200億円)を出資。 - AP1000のDC取得支援として、DOEが2.2億ドル(253億円)を拠出。	2013年以降、NuScaleに対し、DOEが4.57億ドル(530億円)の開発支援。 2020年、今後10年間で運営主体に対し、1,355億円の追加支援を行うことを発表
運転中	中国：4基（2018-19運開）	—
建設中	- 米国：2基（2013年～、2023年運開予定） - 中国：2基（2019年～、2025年運開予定）	—
計画	- 中国：4基（運開時期未定） - 東欧：ポーランド（最大6基、2033-43年運開予定）、ウクライナ（最大9基、運開時期未定）	米国：1サイト・6モジュール（2029年運開予定、国研の敷地内で建設） 米、加、欧、中東、アジア、アフリカとMOU締結



①ー 1. 開発の方向性：米国（原子カイノベーション支援プログラム（ARDP））

- 米国エネルギー省（DOE）は2020年から、革新炉の実証を目指した革新的原子炉実証プログラム（ARDP:Advanced Reactor Demonstration Program）を開始。
- 技術熟度・実用化時期に応じて軽重をつけ、3種類のプランで多様な炉型の実証・開発を支援。

革新炉実証

実用化時期
～2028年

7年以内に稼働する2つの革新炉原子炉の建設を支援
支援額：50%のコストシェアのもと7年間・2炉型で**\$3.2B(3200億円)**
①TerraPower社：Natrium(金属燃料ナトリウム冷却高速炉)
②X-energy社：Xe-100(高温ガス炉)



将来的な実証に向けたリスク低減

2030～
2034年

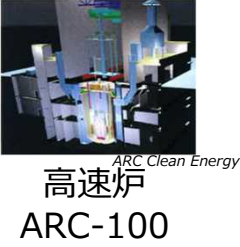
10～14年後に許認可・実用化される5炉型に対し、技術・運用・規制課題の解決支援
支援額(最大)：**\$303M(303億円)**
①Kairos Power社：ヘルメス試験炉(溶融塩冷却高速炉)
②Westinghouse社：eVinci(マイクロ炉)
③BWXT社：BANR(マイクロ炉)
④Holtech社：SMR-160(小型軽水炉)
⑤Southern Company Services社：MCRE(溶融塩炉)



革新的炉概念2020

2035年～

2030年代半ばに実用化する可能性のある3炉型に対し設計支援
支援額(最大)：**\$27.5M(27.5億円)**
①ARC社：ARC-100(ナトリウム冷却高速炉)
②General Atomics社：FMR（ヘリウム冷却高速炉）
③MIT：MIGHTR（高温ガス炉）



①ー 2. 開発の方向性：英国（高温ガス実証炉）

● 英国は、SMRや高温ガス炉の2030年頃の建設・運転を目指して設計の調査・開発を実施。

高温ガス炉実証炉の開発スケジュール

・2021年12月、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）は、2030年代初頭の実証を目指して建設するAMR技術の1つとして、高温ガス炉（HTGR）を正式に選択。

先進的モジュール式原子炉(AMR)の研究開発・実証プログラム

2022年～

フェーズA：基本設計（FEED）関係の予備調査

支援額(最大)：250万ポンド(約3億9,000万円)
・BEISはHTGR実証炉の概念をまとめるほか、研究開発上の課題や技術課題を特定して、その実行可能性を検討

2023年～

フェーズB：詳細設計の基礎となるFEED調査

支援額：「フェーズA」で予算推定を実施中
・「フェーズA」で選定された複数の提案者がHTGRの概念設計を詳細に評価し、投資総額やライフサイクル・コストを正確に見積もる予定

2025年～

フェーズC：サイトや建設、運転の許認可活動

支援額：「フェーズA」で予算推定を実施中
・「フェーズB」で選定された提案者が建設サイトに最適の詳細設計作業を実施予定

2030年代
初頭

高温ガス炉の実証炉を運転開始

①ー3. 開発の方向性：仏国（EPR・EPR2/NUWARD/革新的原子炉）

- 仏国では加圧水型炉「**EPR**」を建設中(2023年に燃料装荷の予定)。「**EPR2**」は2028年までの初号機着工、2035年までの運転開始を目指す。
- **小型軽水モジュール炉「NUWARD」や革新的原子炉については2030年のプロトタイプ建設を目指す**等方向性を持った具体的開発プロジェクトあり。

状況	大型軽水炉 EPR	大型軽水炉 EPR2	小型炉 NUWARD	廃棄物管理が容易な炉 (熔融塩炉、高速炉等)
政府支援	- 人材支援：約1.1億ユーロ - 中小企業支援(ファンド創設)：総額約2億ユーロ (2020/9、フランス復興計画)		5,000万ユーロの予算を割り当て (2020/9、フランス復興計画) 「France 2030」に基づき、5億ユーロを支援 (2022/2、マクロン大統領)	「France 2030」に基づき、5億ユーロを支援 (2022/2、マクロン大統領)
運転中	- 中国：2基(2018-19年運開) - フィンランド：1基(2022年現在、試運転中)	—	—	—
建設中	- フランス：1基(2007年～、2023年燃料装荷予定) - イギリス：2基(2019-20年～、2026-27年運開予定)	—	—	—
計画	イギリス：2基(時期未定) ※このほかEDFは、チェコ、ポーランド、インドなどでのEPR建設を見据え、各国の産業界と協定を締結している。	2028年までに初号機着工 2035年までに運転開始を目指す	2030年から実証プラントの建設を開始予定 ※建設には3年かかる見込み	2030年までにプロトタイプ^oの建設を目指す。

①ー 4. 開発の方向性：日本（グリーン成長戦略）

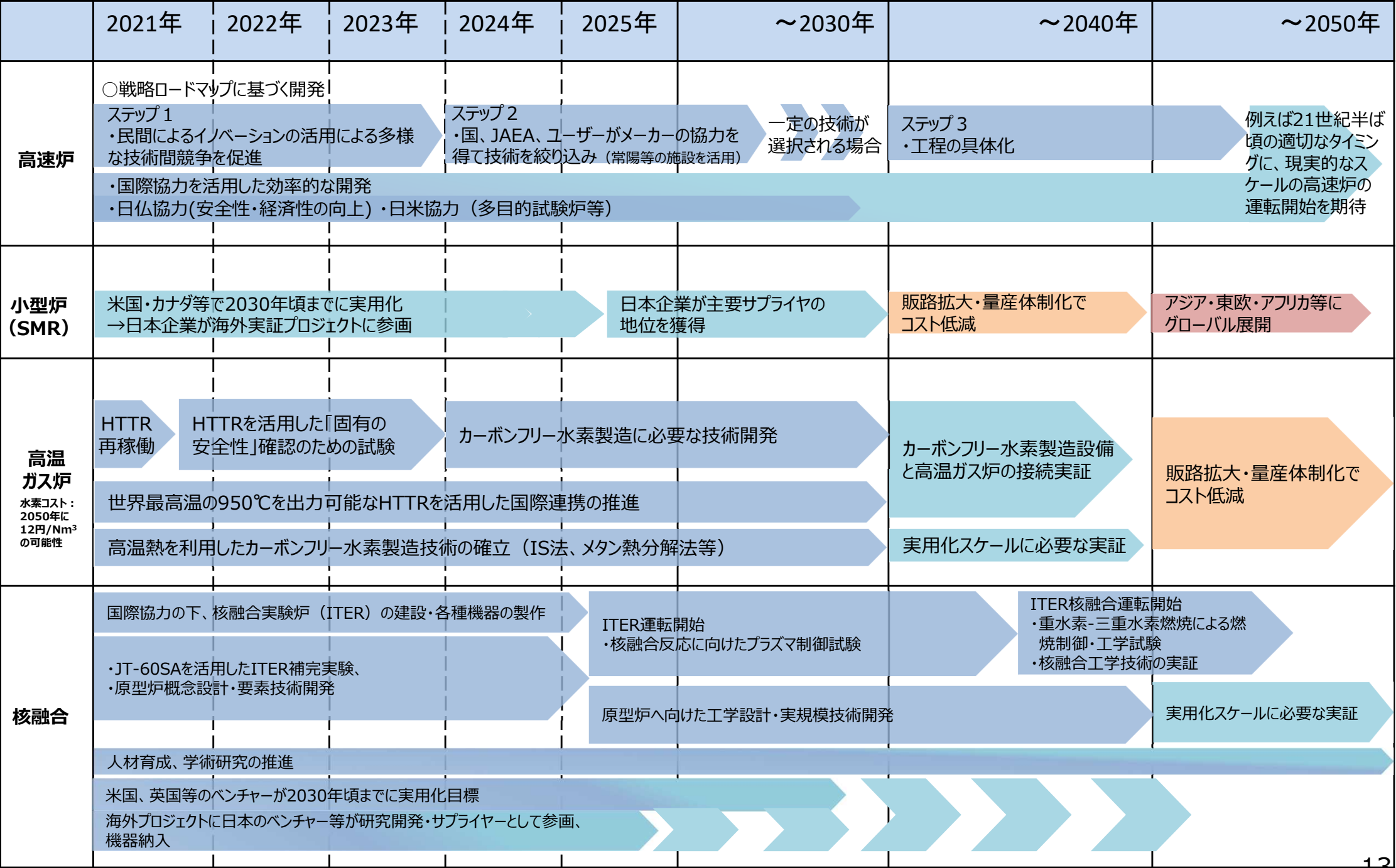
● **原子力は、実用段階にある脱炭素の選択枝。**可能な限り依存度を低減しつつ、**国内での着実な安全最優先の再稼働**の進展とともに、海外（米・英・加等）で進む次世代革新炉開発に、高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、多様な原子力技術のイノベーションを加速していく。

	現状と課題	今後の取組
高速炉	資源循環性の向上が必要 - 原子力の持続的な利用には、放射性廃棄物の減容化・有害度低減、中長期的には資源の有効利用に向けた技術開発を進めることが重要。 世界各国で高速炉の開発が進展 - ロシアは実証炉を運転開始済みで、中国も実証炉建設中。 - 北米でも政府支援を得て、ベンチャー企業等による高速炉開発が加速。	国際連携を活用し開発を着実に推進 「戦略ロードマップ」に基づき、例えば今世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待。それに向けて、2023年度末頃までは多様な技術間競争を促進。<u>日仏、日米協力</u>で効率的な開発を推進。 原子力研究開発機構が保有するデータ・施設を最大限活用 - 建設・運転・保守経験で培われたデータ、施設を最大限活用。「常陽」の再稼働に向けた準備を速やかに進める。
小型炉 (SMR)	各種要素技術の開発が必要 - 海外での実証プロジェクトと連携した基本設計・開発。 - 日本企業独自で多様なニーズを見据えた小型炉を自主開発。 革新的技術の安全性や経済性を検証 - 安全性は、米・英・加で許認可取得に向けたプロセスが進行中。 - 経済性は、量産化で追求。	国際連携プロジェクトへの参画 2020年代末の運転開始を目指す海外の実証プロジェクトと連携した日本企業の取組に対し、安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置きつつ支援を行う。海外で先行する規制策定を踏まえ、技術開発・実証に参画。 - 日本企業がプロジェクトの主要プレーヤーとして参画し、脱炭素技術であるSMRの安全性の実証に貢献。<u>主要サプライヤーの地位を獲得</u>。2020年代末の海外でのSMR初号機開発後、海外連携によりグローバル展開と量産体制を確立。
高温ガス炉	開発・運転ノウハウの蓄積と実用化スケールへの拡張が必要 <u>高温工学試験研究炉（HTTR）で950℃（世界最高水準）・50日間の高温連続運転を達成（JAEA）。</u>安全性を実証。 - 日本企業が水素製造・発電コジェネプラント、蓄熱可能な発電用高温ガス炉などを開発中。 - 高温ガス炉と水素製造施設との接続技術の確立が必要。	HTTRを活用した試験・実証等 - HTTRを活用し、<u>安全性の国際実証に加え、2030年までに大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術開発を支援。</u> - 安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置いた開発支援を行いながら、技術開発・実証に参画。<u>海外の先行プロジェクトの状況を踏まえ、海外共同プロジェクトを組成していく。</u> <u>日本の規格基準普及</u>に向けた他国関連機関との協力を推進。
核融合	国内施設を通じた研究開発や核融合実験炉（ITER）建設に向けた製造・試験、各種要素技術の開発が必要 - プラズマ制御技術の高度化に向けた試験実施。 <u>ITER本体の組立・据付開始、コイル等主要機器を日本から納入。</u> - 安全で安定稼働できる核融合原型炉の設計。	ITER計画等の着実な推進 - ITER計画等の国際共同技術開発や将来的な原型炉建設計画に向けた取組を通じて<u>主要機器の実証と、出力の長時間維持技術</u>を確立。日本の核融合原型炉の建設計画に反映。<u>2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。</u> - 核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。

①ー 4. 開発の方向性：日本
(グリーン成長戦略)

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●具体化すべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等



①ー4. 開発の方向性：日本（高速炉戦略ロードマップ）

- 高レベル放射性廃棄物の減容化、有害度低減、資源の有効利用といった核燃料サイクルの効果を高める高速炉開発を推進。
- 2016年12月、「『もんじゅ』の取り扱いに関する政府方針」とともに、高速炉開発の目標や原則を定めた「高速炉開発の方針」を決定。本方針に基づき、2018年12月、研究開発政策の在り方やプレーヤーの役割を定めた「戦略ロードマップ」を策定し、ロードマップに基づく高速炉開発を推進中。

「戦略ロードマップ」（2018年12月21日 原子力関係閣僚会議決定）

＜スケジュール＞

- “高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミング”
- “例えば21世紀半ばの適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待”

＜開発の進め方＞

【ステップ1：競争の促進】

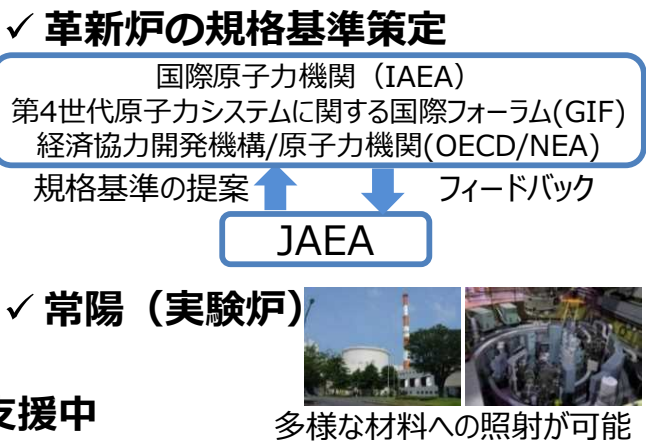
“当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。”

【ステップ2：2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込み・重点化】

【ステップ3：今後の開発課題及び工程についての検討】

イノベーションによる技術間競争と基盤整備の取組

- 高速炉委託事業において、多様な高速炉概念に幅広く適用できる評価ツール、基準の整備や、枢要技術の確立、試験研究施設の整備等を実施
- 2019年度より、補助事業において民間企業による多様なイノベーションを推進
- JAEAにおいて、イノベーションの基盤を整備
- ✓ 高速炉を含む10のフィージビリティスタディを支援中



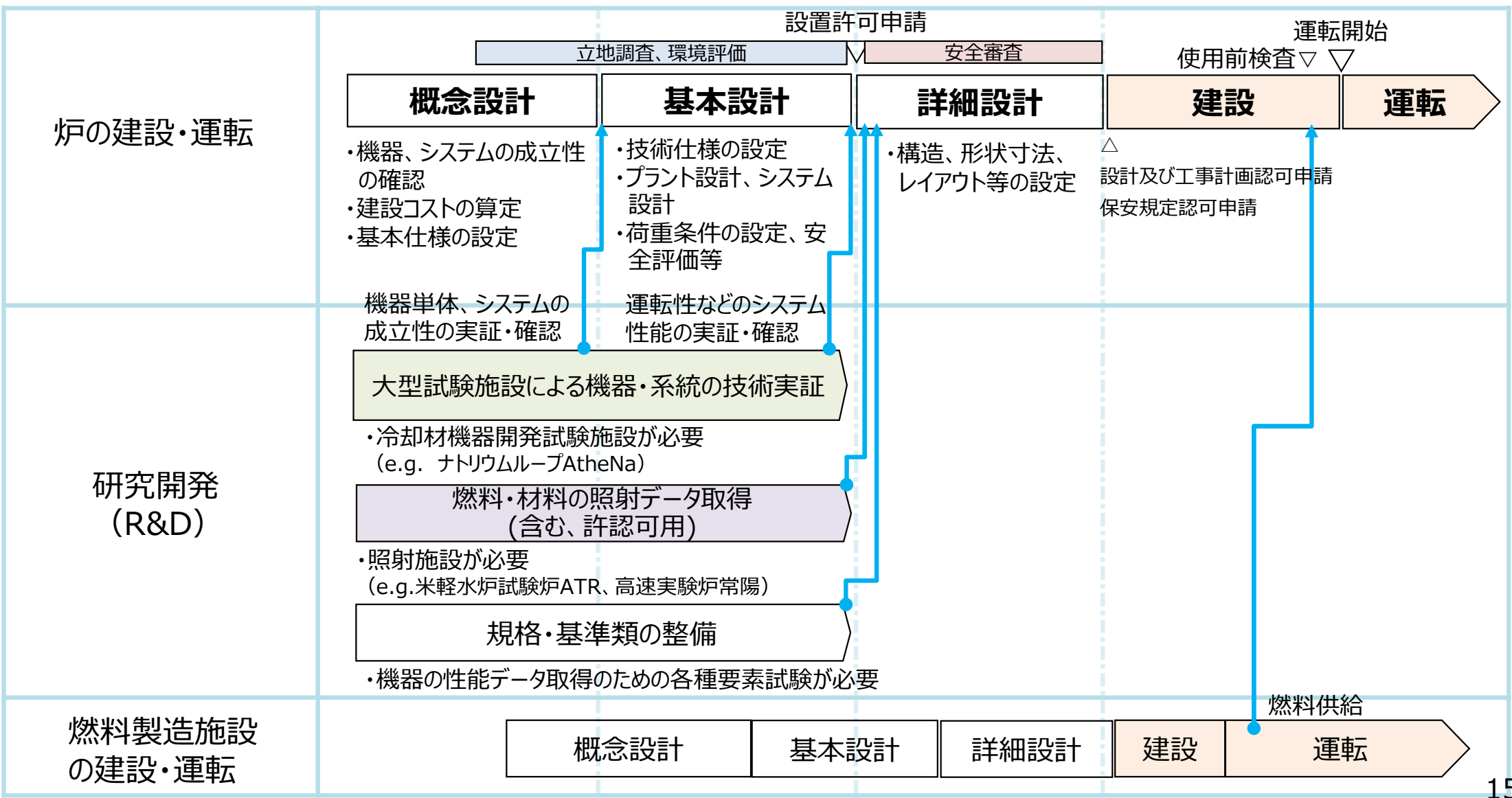
※**地域での取組例（福井県・共創会議）**

地域企業等の関係者の協力を得て原子力関連研究開発・人材育成拠点の形成に向けた検討を推進

- ✓ CN実現に向けた原子力の持続的な活用
- ✓ **もんじゅ廃炉データを活用した高速炉開発**
- ✓ 試験研究炉を活用した原子力の用途拡大
- ✓ 原子力・エネルギー教育の推進

① – 5. 原子力開発の具体的工程

- 原子力開発は、各設計段階において、機器・システムの技術実証（設計成立性の実証、性能実証）のための試験や燃料・材料の照射試験などのR&Dを行いながら進める必要。
- 前述の海外事例においては運転開始時期を念頭に置いた開発工程（許認可前）を組み、それに応じた政府支援がされているが、国内では炉ごとの開発マイルストーン・優先順位が不透明。



1. 革新炉開発の課題の整理

①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化

②予算（開発、施設整備）の整備

③制度（規制、ファイナンス等）の整備

④革新炉開発の体制の整備

⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

②ー 1. 予算：米英 具体的な実証・実装プロジェクトに紐付けた大規模支援

- 米・英は、相次いで原子力への大規模な支援策を発表。①安全性を高めた大型軽水炉の支援等、②革新炉の研究開発支援の二本立てであり、後者は具体的な実証・実装プロジェクトに紐付け。

	 米国	 英国
大型軽水炉 支援	◆既設支援 - 経済的困難な状況にある既設炉への財政支援(クレジット付与) \$60億(約6,000億円)／5年間 - 既設炉の販売電力量に応じ税控除(法案未成立)	◆新設支援 - 国内新規建設を支援する資金調達モデル(RABモデル)関連法案を提出 - 大型原子力発電所の新規建設支援 最大 £ 17億(約2,500億円)
	◆研究開発 - 革新炉実証プログラム(ARDP) \$32億(約3,200億円)／6年 - 実証炉 2 基に対する資金支援 ・TerraPower社(高速炉)：約2000億円 ・X-energy社(高温ガス炉)：約1200億円 - SMRの技術開発支援・財政支援 ・NuScale：\$5.3億(約530億円) (R&D) \$13.55億(約1355億円)／10年間(運営主体支援)	◆研究開発 - 「革新原子力ファンド」を設立(2020年12月) £ 3.85億(約577億円) ・SMR開発：£ 2.15億(約322億円) ・AMR実証炉開発(高温ガス炉) ：£ 1.70億(約255億円) - 「未来の原子力実現基金」を設立(2021年10月) £ 1.2億(約180億円)

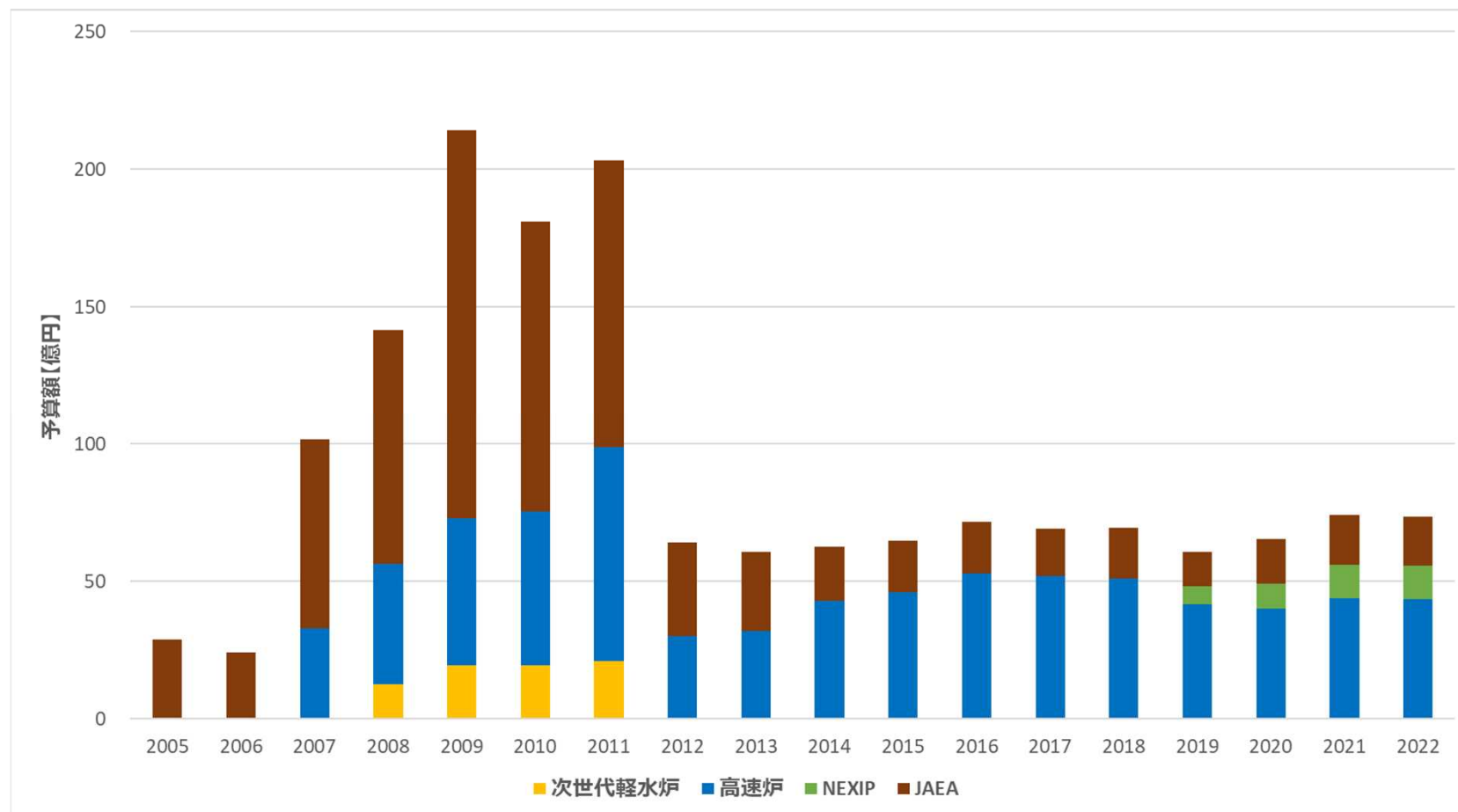
②ー 2. 予算：仏韓 米英同様、プロジェクトベースでの支援を具体化

- 仏韓も具体的な原子力支援を表明。
- 仏韓では国営企業が、新規建設で産業基盤を維持しつつ、将来に向けた革新炉開発も推進。

	 仏国	 韓国
大型軽水炉支援	◆新設支援 2020年9月「France Relance」にて原子力産業の支援策を発表。 - 人材支援 €約1.1億(約143億円) - 中小企業支援（ファンド創設） 総額€2億(約260億円) ◆マクロン大統領は、2022年2月に「6基のEPR2の新設に着手し、更に8基の新設に向けた検討を開始」と宣言。	◆海外新設支援 - 輸出推進のため「原子力輸出諮問委員会」を2021年に設置。 - 中小企業の資機材輸出のためのポータルサイト立ち上げ ◆国内建設（4基建設中） - 政府および政府系金融機関が電力公社に50パーセント超の株式を保有し、下支え。
非従来型炉 研究開発支援	◆研究開発 SMRを含むプロジェクトに€1B（約1,300億円） マクロン大統領は、「2030年までに、革新的な小型原子炉をフランスに導入する」と発言。	◆ 研究開発 SMRを含むプロジェクトに2兆7000億W（約2700億円）／ 5年間 ※詳細な内訳は不明。

②ー3. 予算：日本 革新炉開発予算の低迷

- 資源エネルギー庁における革新炉開発予算は、ピーク時(2010年前後)は約100億円あったものの、ここ10年ほどは半減。また、JAEAにおいても震災後は新規制対応や廃炉等にリソースが割かれ、革新炉R&D予算は急減。
 - プロジェクト予算としては大幅に不足しており、震災以前に築いた人材・技術基盤の維持も困難なレベル※。結果として、民間企業を取り込んだプロジェクト組成・管理の知見蓄積が進んでいない。
- (※現行の予算枠組は「多様な技術間競争」を掲げて様々な炉型技術のFS・要素技術の開発を対象としていることもあり、例えばNEXIPでは10億円規模の金額を10程度の事業に分散充当するにとどまっている。)



②ー4. 施設整備：今後革新炉開発に必要な施設整備

● 将来の革新炉開発のためには、燃料や材料、構造・強度評価等で様々な施設整備が必要。

	研究開発項目		研究開発に必要な施設	整備状況
軽水炉	炉物理分野	臨界実験	臨界実験装置(熱中性子体系)	STACYを整備中 (高速体系の臨界実験装置なし)
	熱水力分野	冷却ループ、格納容器等模擬試験	大型試験施設(LSTF、CIGMA等)	利用可能
高温ガス炉	熱利用分野	高温ガス炉と水素製造施設の接続技術確立	水素製造施設【HTTR-熱利用試験施設】	未整備
		ヘリウムガスタービン発電技術の確立	ヘリウムガスタービン炉外試験装置	未整備
高速炉	安全性向上分野	シビアアクシデントやナトリウム水反応対策	熔融炉心物質挙動試験施設(MELT) 蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3)等	利用可能 (一部経年劣化対策必要)
	炉心燃料・材料分野	照射試験	高速実験炉「常陽」と照射後試験施設	新規制基準対応中
	ナトリウム試験	Na大型機器試験	冷却系機器開発試験施設(AtheNa) Na中計測試験施設	加熱器整備中 (今後実験装置を設置予定)
軽水炉・高温ガス炉・高速炉に共通	炉心燃料・材料分野	ホット試験	グローブボックス(空気・不活性雰囲気) ホットセル(空気・不活性雰囲気)	NUCEF、CPF、Puセンター、 大洗照射後試験施設(FMF)等
		中性子等照射場	試験研究炉	JRR-3：照射場提供には施設のアップデートが必要
	構造強度評価		耐震試験設備	大洗研中規模加振機(メカトロニクス)は停止中
	燃料製造	研究炉燃料 HTTR燃料 常陽照射試験用燃料	試験炉の燃料製造設備(なし) MOX燃料製造(使用施設:Pu-1,Pu-3)	JRR-3:(フラマトムから輸入) STACY、HTTR:該当設備なし 常陽:新規性基準対応検討中

②ー5. 施設整備：将来への投資としてレガシー施設の廃炉・整備

- 米国やカナダでは、基金設置や投資等を通じて、国研レガシー施設の廃炉・除染をタイムリーに実施。
- カナダでは、老朽化したインフラを積極的に廃止しつつ、最新の施設の整備に取り組んでいる。

米国

- 1989年、DOEの環境管理局にて、政府出資の原子力研究によって発生した環境負債に対処する廃炉・環境修復活動を管理。
- 1992年、連邦政府のウラン濃縮施設の閉鎖と関連廃棄物及び環境浄化を支援するための「濃縮施設の除染・廃炉（UED&D）基金」を設立。

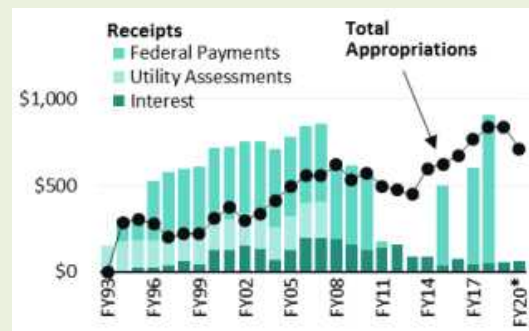
※1940～1950年代に建設された3つの施設(Oakridge, Paducah, Portsmouth)の廃炉・環境浄化活動が進行中。



環境管理室の予算推移
(\$1MM)※

出典：
<https://www.energy.gov/em/budget-performance>

※UED&D基金を含む

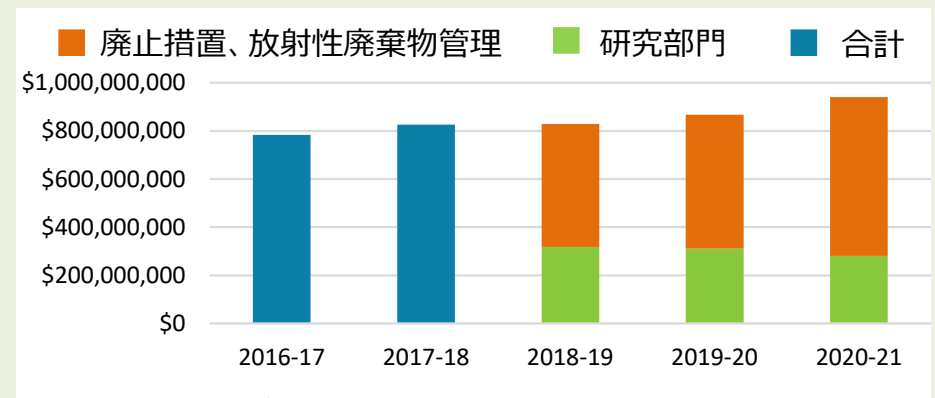


UED&D 基金からの支出額
(\$1MM)

出典：
<https://sgp.fas.org/crs/nuke/IF11372.pdf>

カナダ

- カナダ原子力公社（AECL）はカナダ全土の国研施設の管理・運営の方向性を示しつつ、民間機関CNEAと契約して管理・運営させている。
- AECLはChalk River研究所に対し、2016年から10年間で12億ドルを投資。世界トップクラスの原子力科学技術キャンパスを目指しリニューアル中。
- 2021年度の政府支援（レガシー施設関連）：
 - 原子力科学技術活動およびChalk River研究所での継続的な安全操業の支援：1億8100万ドル
 - Chalk River研究所とWhiteshell研究所の敷地における環境修復、廃炉、廃棄物管理活動等の環境修復プログラム：6億3600万ドル
 - Chalk River研究所のインフラ更新：1億1900万ドル



カナダ原子力公社（AECL）の支出の推移

出典：GC InfoBase, <https://www.tbs-sct.canada.ca/ems-sgd/edb-bdd/index-eng.html#start>

1. 革新炉開発の課題の整理

- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④革新炉開発の体制の整備
- ⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

③ー1. 規制：米国（規制・新設許認可プロセスの概要）

- 米国の新設許認可プロセスは、当初、建設・運転の2段階審査であったが、プロセス効率化のため、1989年に建設・運転の一括審査を導入。個別炉型の標準化を進めるべく、型式認証制度も導入。
- また、米国には、ベンダーが規制当局に直接相談できる制度として、申請前審査制度も確立。

10 CFR Part 50 (旧来プロセス)

- 建設許可（CP）と運転認可（OL）の2段階の審査で構成。
⇒原子力開発初期の事情（急速な研究開発、建設中に設計変更の可能性）を考慮した2段階プロセス。

CP（建設）⇒OL（運転）

- 問題点として、CPとOLでの審査の重複や審査の長期が指摘される。
⇒新設許認可プロセスの効率化・簡素化の必要性が認識される。



10 CFR Part 52 (新規プロセス)

- 審査の効率化を目的に、旧来のCPとOLを統合した建設・運転一括認可（COL）を新たに作成。
- さらに、個別炉型の標準化を進めるべく、型式認証制度（DC、SDA）も導入。
⇒DC、SDAはベンダーが申請者となり、NRCとの審査活動に対応する。

COL（建設・運転一括）
※申請ではDC、SDAを参照可

- ただし、Part 52でもなお残る課題については、NRCと産業界が対応中。（26ページ参照）

申請前審査制度

- NRCでは、新設等の大規模な申請の前に、申請者とNRCとの間で申請前審査と呼ばれる事前折衝を行うことが通例となっている※。
- 申請前審査の目的は、申請書のスコープや想定される課題等について議論を行い、本審査が円滑に進むようにすること。
- 通常、型式認証制度（DC、SDA）の審査においても、申請前審査が実施され、申請者であるベンダーがNRCに直接相談できる場として機能している。

※申請前審査は、NRCの非公式の制度としては古くから存在しているが、NRCは革新炉の許認可における申請前審査の指針を2021年に作成。

【参考】米国（申請前審査制度）

- NRCでは、新設等の大規模な申請の前に、申請者とNRCとの間で申請前審査と呼ばれる事前折衝を行うことが通例となっている。
- 申請前審査は、NRCの非公式の制度としては古くから存在しているが、NRCは革新炉の許認可における申請前審査の指針を2021年5月に作成。

革新炉の許認可における 申請前審査の指針※（2021年5月）

- NRCは革新炉の審査活動の効率化を目的に、革新炉ベンダーに対して、審査前審査の指針を作成。
- 申請前審査の実施内容は以下の通り。
 - ① 個別の技術課題の検討結果がまとめられたトピカルレポートの審査（技術テーマ：設計基準、認可ベース事象の選定及びSSC分類、燃料設計、ソースターム、QAプログラム、機密情報の取り扱い、事故解析手法）
 - ② 個別の技術課題に関するミーティング、監査、白書作成（技術テーマ：PRA、規制ギャップ解析、規制政策上の課題、設計特徴、民間基準）
 - ③ 環境審査関連の議論
 - ④ 申請前準備評価（本申請に先立ち、申請の準備状況をNRCが評価）

※現時点で、本指針はDraft（案）の状態であるが、NRCホームページでは、申請予定のベンダーに対して、本指針案の参照を推奨。

申請前審査制度の利点



申請者の利点	NRCの利点
審査活動の予見性が向上（プロジェクトリスクの低減）。	審査に関与する <u>初期段階での当該設計の習熟</u> 。
NRCが当該設計に習熟することによる審査活動の効率化（ <u>審査期間・コストの低減</u> ）。	申請前段階での情報公開による <u>審査活動の透明性確保</u> 。
NRC及び申請者以外で環境審査に関与する規制機関（環境保護庁等）の関与による <u>環境審査の効率化</u> 。	申請者が検討している申請アプローチの事前の把握（ <u>革新炉の炉型別で多様な申請アプローチが想定</u> されている）。
NRCの諮問機関であるACRSがトピカルレポートを審査することによる、 <u>ACRSによる審査の効率化</u> 。	NRCスタッフとACRSとの間での事前折衝による <u>審査活動の重複回避</u> 。

③ー1. 規制：米国（規制・新設許認可プロセスの改善動向）

- 新設許認可プロセスの効率化を目的に、10 CFR Part 52が導入され、大型炉（ABWR等）や小型炉（NuScale）の審査で適用されたものの、なお審査コストの上昇等の課題が残る。
- NRCと産業界は、審査プロセスの改善に向けた検討（許認可近代化プロジェクト）を実施中。

産業界によるNRCへの改善提案

- 教訓：新型炉は安全性が向上し、リスクが低減しているものの、過去の審査よりも**負担（審査時間、コスト）が増加**。
↓
- 提案：審査における**リスク知見の活用**の促進。さらに、**審査時間やコストの明確化**及び根拠の提示。
- 教訓：NRCの諮問機関であるACRSは新型炉の審査活動にも関与するが、ACRSの役割、スコープが明確化されておらず、**審査が広範に及び**に、**NRCスタッフによる審査とも一部重複**。
↓
- 提案：新型炉の審査における**ACRSの役割**の明確化。


**NuScaleのDC審査の
教訓事項報告書**
(2021年2月付)


**新型炉の審査経験に関する
NEIの見解報告書**
(2021年6月付)



NRCの対応



NuScaleのDC審査 教訓報告書（2022年3月）

- NRCはDC審査を目標以内に完了させたが、今後の新型炉の審査を改善するための良好事例や教訓事項が存在していたと認識。
- 【良好事例の一例】
- 申請前審査での事業者との積極的な情報交換
- 難易度の高い課題のリストを作成し、優先的に対応
- 【今後の検討課題の一例】
- リスク情報を活用した審査戦略の適用方法
⇒産業界と共同で**新型炉向けの許認可近代化プロジェクト（LMP）**を実施中

【参考】新型炉向けの許認可近代化プロジェクト（LMP）

- DOEは、革新炉の許認可対応支援を目的に、新型炉向けの許認可近代化プロジェクト（LMP）を2016年に開始。DOEとのコストシェアに基づき、米国原子力事業者であるSouthern社が主導的役割を担い、DOE国研（INL）、NEI、NRCが技術支援を提供。
- 産業界がリスク情報を活用したガイダンスを作成し、NRCがエンドース。

LMPの背景

- 革新炉の開発及び普及促進には、効率的かつ安全性に注力した規制枠組みや許認可プロセスが必要。
- 適切な規制枠組み、サプライヤ、規制機関が存在することで、革新炉をより効率的に設計、許認可、建設することが可能となる。

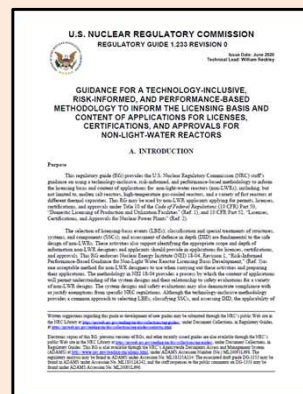


- 既設大型炉向けの規制を対象にした既存の規制枠組みとのギャップ解消を目的に、DOEは2016年にLMPを開始。
- LMPでは、DOEとの費用分担契約に基づき、米国原子力事業者であるSouthern社が主導的役割を担い、INL、NEI、NRCが技術支援を提供。

LMPの成果

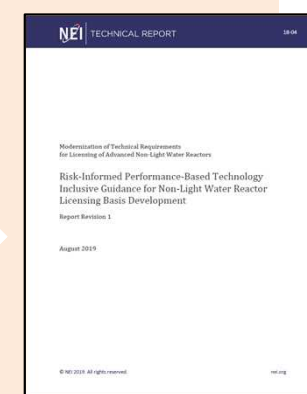
- 産業界は、LMPの成果物として、以下のガイダンスを作成
 - NEI 18-04「リスク情報を活用したパフォーマンスベースの非軽水炉認可基準」
 - NEI 21-07「NEI 18-04の手法を用いる非軽水炉安全解析報告書に関する技術包括的なガイダンス」⇒これらのガイダンスにより、様々な炉型の安全特徴に対応可能な許認可プロセスの構築を支援。また、リスク情報を活用したパフォーマンスベースの手法を採用することで、革新炉の安全性に見合った合理的な審査が実施可能。
- NRCはNEI 18-04のエンドースを目的に、Reg. Guide 1.233を作成。⇒これにより、NRCの許認可プロセスにおいて、NEI 18-04の適用が可能に。

LMPの成果物



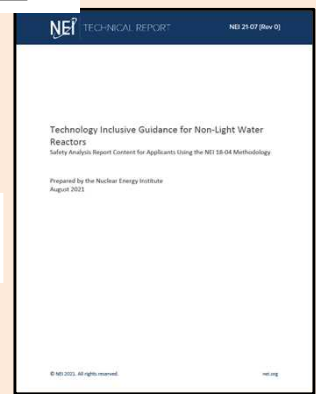
▲Reg. Guide 1.233

エンドース



▲NEI 18-04

適用指針



▲NEI 21-07

【参考】NEI 18-04の概要

- 産業界は新型炉向けの許認可近代化プロジェクト（LMP）の成果物として、NEI 18-04「リスク情報を活用したパフォーマンスベースの非軽水炉認可基準」及びNEI 18-04の適用指針（NEI 21-07）を作成。
- NEI 18-04の活用のために、NRCはNEI 18-04を規制ガイド（Reg. Guide 1.233）でエンドース。

NEI 18-04の概要



【基本方針】

- リスク情報を活用したパフォーマンスベースの評価枠組みを提供。
⇒ リスク評価から得られた知見を活用するとともに、定量化可能なパフォーマンス指標に基づき安全機能の有効性を評価。
- 広範な種類の非軽水炉（例：溶融塩炉、高温ガス炉、高速炉）に適用可能な評価枠組みを提供。

【評価項目】

- 認可ベース事象の選定
- 構築物、系統及び機器（SSC）の安全分類
- 深層防護（DID）の妥当性評価

エンドース

適用指針

Reg. Guide 1.233の概要



- NRCが容認可能なガイダンスとしてNEI 18-04を全面的にエンドース。
⇒これにより、NRCの許認可プロセスにおいて、NEI 18-04の適用が可能に。
- NEI 18-04の適用方法の明確化するためのNRCの見解とNEI 18-04の内容でNRCが重要である点と考える点を提示。

NEI 21-07の概要



- NEI 18-04を活用した安全解析書（SAR）の作成指針を提示。
- 具体的な記載事項は以下の通り。
 - SARに含まれるべき記載内容のスコープ
 - 記載内容の詳細度
 - 記載内容の構成

③ー 2. 規制：英国 革新炉安全審査を支える規制

- 一般設計評価（GDA）で英国内で建設可能性のある新型炉に対してその設計の型式認定を与える。
スコープ・タイムスケールの相談始め、ベンダーが段階を踏んで規制当局に直接相談ができる仕組み。
- 2021年、SMRやAMR設計に対するGDAを開始。

英国での設計認証制度

一般設計評価（GDA）

- 2021年に開始した、英国内に建設可能性のある**新型炉に対してその設計の型式認定を付与**する制度。
 - GDAを希望するベンダーは、規制当局（ONR）に申請。
- ＜評価におけるステップ＞
- ステップ1：開始ステップ
- スコープやタイムスケール等についてONRと申請者が合意
- ステップ2：全般的なセーフティケース及びセキュリティケースの基本的な評価
- 設計評価の進展を妨げる可能性のある潜在的な「致命的問題」を特定
- ステップ3：全般的なセーフティケース及びセキュリティケースの詳細な評価

英国での革新炉設計認証に関する動向

エネルギー白書（2020年）

- 2021年に、SMR設計に対して、開発者の提案した設計を承認する規制プロセスであるGDAを開始する。



BEISはGDAの対象をSMRやAMRに広げると表明（2021年）*

- GDAの申請ガイダンスを公表
⇒ SMRやAMRを開発中の企業に対して、政府やONRが審査で要求するデータについて情報提供することが目的



Rolls-Royce SMRのGDAステップ1を開始（2022年）

*1:BEIS, <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies>

*2:BEIS, <https://www.gov.uk/government/publications/entry-to-the-generic-design-assessment-for-advanced-nuclear-reactors>

③ー3. 規制：カナダ 革新炉安全審査を支える規制

- 2012年、カナダ原子力安全委員会（CNSC）は、ベンダーの要望により、ベンダーが要請した場合に、許認可前ベンダー設計レビュー（Pre-Licensing Vendor Design Review: **VDR**）を提供。
- CNSC の要求とカナダの規格・基準に原子炉設計が高いレベルで適合していることを検証し、設計段階の早期にフィードバックを提供する。VDRは以下の3つのフェーズで構成される。
 - フェーズ1：規制要件順守の許認可前評価
 - フェーズ2：許認可における潜在的／基本的障壁に対する事前評価
 - フェーズ3：フォローアップ

許認可前ベンダー設計レビュー（VDR）の実施状況*

ベンダー	設計名	冷却材	レビュー開始	実施状況
Terrestrial Energy	IMSR	熔融塩	2018年12月（フェーズ2）	フェーズ2評価中（フェーズ1完了）
Ultra Safe Nuclear	MMR-5、MMR-10	高温ガス	2021年6月（フェーズ2）	フェーズ2評価中（フェーズ1完了）
LeadCold Nuclear	SEALER	熔融鉛	2017年1月	フェーズ1保留中（ベンダー側の要請）
ARC Nuclear Canada	ARC-100	ナトリウム	2022年2月（フェーズ2）	フェーズ2評価中（フェーズ1完了）
Moltex Energy	Stable Salt Reactor	熔融塩	2017年12月	フェーズ1完了
Holtec	SMR-160	軽水	2018年7月	フェーズ1完了
NuScale Power	NuScale Integral	軽水	2020年1月	フェーズ2評価中
U-Battery Canada	U-Battery	高温ガス	保留中	フェーズ1保留中（開始前）
GE-Hitachi	BWRX-300	軽水	2020年1月	フェーズ2評価中
X Energy	Xe-100	高温ガス	2020年7月	フェーズ2評価中

*1:GD-385, https://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/May-2012-GD-385-Pre-licensing-Review-of-a-Vendors-Reactor-Design_e.pdf
*2:CNSC, <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/>

③ー4. 規制：日本の安全設計基準が国際標準へ（高速炉）

- 第4世代炉国際フォーラム（GIF）において、我が国主導で1F事故の教訓を活かし、ナトリウム冷却高速炉の安全設計基準を整備。IAEA、OECD/NEAにおいても、国際基準として審議中。

第4世代炉共通の安全原則

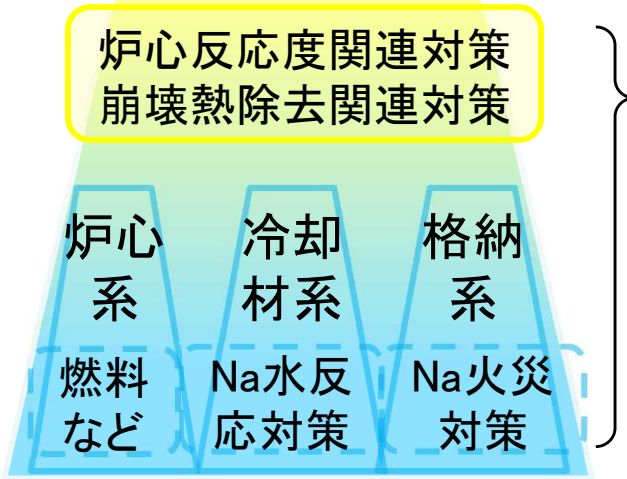
安全目標 ----- 例：緊急時退避の必要性を回避
基本的安全アプローチ ----- 例：深層防護第4レベル対応・受動的特性活用

第4世代SFRの安全設計クライテリア(SDC) ----- 安全原則を要件化



SFRの一般的特徴に基づく基本的要求
例：受動的な炉停止系及び崩壊熱除去系

第4世代SFRの安全設計ガイドライン(SDG)



炉心系	炉心燃料の健全性	① 高温、高内圧、高照射環境に耐える燃料設計 ② 炉心冷却性を確保するための炉心設計
	反応度制御	③ 能動的炉停止 ④ 受動的炉停止または固有反応度特性の活用 ⑤ CDA時の過大なエネルギー発生防止と原子炉容器内保持冷却
冷却材系	機器の構造健全性	⑥ 高温・低圧条件に耐える機器設計
	1次冷却材系	⑦ カバーガスとそのバウンダリ ⑧ 液位確保対策
	Na化学反応対策	⑨ ナトリウム漏えい燃焼対策 ⑩ ナトリウム-水反応対策
	崩壊熱除去	⑪ 自然循環の活用 ⑫ 信頼性確保（多様性・多重性）
	格納系	⑬ 中間冷却材系の有する機能 ⑭ 格納バウンダリの形成と荷重

③ー5. 規制：国際機関を活用した革新炉規格基準の議論も活性化

- 国際機関において、革新炉の効果的な規制に向けた、安全上・審査上の課題の特定及び、許認可アプローチの再検討の動きが活性化している。
- 国際的な標準化及び規制環境整備の加速化の観点から、各国の規制当局間の連携強化を促進。

<IAEA>

- 2015年、SMR開発国の規制当局を中心にSMRの規制に関する知見や経験を共有するフォーラムを設置。
- 加盟国の議論から得られた教訓を IAEA の世界的な安全枠組みに適用するための効率的な手段を提供。
- SMRの審査における共通の安全問題を特定し解決することで原子力安全を向上を目指す。

【検討テーマ】

<フェーズ1（2015～2017）>

- 等級別アプローチ
- 深層防護
- EPZ

<フェーズ2（2017～2020）>

- 許認可に向けた課題
- 設計と安全解析
- 製造、建設と運転

<フェーズ3（計画中）>



<OECD/NEA>

- 規制機関間で安全に関する情報及び経験を効果的に交換するためのフォーラムを構成。
- 新型炉の安全に関するワーキンググループ（WGSAR）で、革新炉の効果的な規制を促進するために、許認可アプローチの改訂や安全研究が必要な分野について議論・提言を実施。
（例：2019年：SFRの燃料性能検証の安全面に関する技術報告書）
- SMR課題と機会を纏めた報告書でSMRの規制に関する見解を整理。
 - 小型炉心に伴う固有な安全性によってセーフティケースが改善される。
 - マルチモジュール化、新型の燃料・冷却材により規制上の考慮事項が増える。
 - 規制における柔軟なアプローチ、国際的な調和が重要。



<EU>

- 欧州でのSMRの規制条件の調整に向けた初期段階のケーススタディとして、EDF主導のコンソーシアムが開発中のSMR設計「NUWARD」の共同審査を予定

【参加機関】

- 原子力安全規制当局（ASN）
- フィンランドの放射線・原子力安全庁（STUK）
- チェコの原子力安全庁（SUJB）



<https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/13428.html>

③ー6．規制：日本の安全規制における事業者の対応（常陽の審査）

- 現行の新規制基準は従来の規制基準に基づいて既存の軽水炉を念頭に基準を強化・新設したもの。
- 高速実験炉「常陽」の安全審査では、高速炉の特徴及び事故進展を踏まえたシビアアクシデント対策の有効性が審査されているところ。
- 今後提案される革新炉等に対しては、規制側と申請側との十分な対話を通じて規制基準や審査プロセスの策定を働きかけていくことが必要。

高速試験炉「常陽」再稼働に向けた審査

- 常陽のシビアアクシデントに関する安全審査では、研究炉規則には具体化されていない、具体的な事故の進展事象に対する対策の有効性評価が求められた^[1]。
 - （例）必ず想定する事故：
 - ✓ 炉心流量喪失時原子炉停止機能喪失(ULOF)
 - ✓ 過出力時原子炉停止機能喪失(UTOP)
 - ✓ 除熱源喪失時原子炉停止機能喪失(ULOHS)
 - ✓ 原子炉容器液位が確保された状態での崩壊熱除去機能喪失(PLOHS)、他
 - このような安全審査の実績は、コードの扱いを含め、高速炉の特徴及び事故進展を踏まえた実証炉規制基準の策定に繋がる。
 - 規制側と申請側との十分な対話を通じて規制基準の策定を働きかけていく。

[1] 日本原子力研究開発機構高速実験炉原子炉施設（常陽）の新規制基準適合性審査について、原子力規制庁 新基準適合性審査チーム、平成29年5月22日。

③ー 7 . 規制：日本の安全規制における事業者の対応（HTTRの審査）

- 高温ガス炉研究炉HTTRの新規制基準適合性審査等の中で、基本「燃料溶融しない」という固有の安全特性に基づく安全設備の重要度や緊急時活動レベルの見直し等が行われた。
- これらの結果を踏まえて、規制側と申請側との十分な対話を通じて、将来の実証炉に向けた規制当局に対する働きかけを事業者が実施していく。

HTTR安全評価結果

- 設計基準事故を超える事故においても、燃料溶融なし、黒鉛酸化等による炉心の著しい損傷が発生なし、大規模な放射性物質の放出なしを承認。

BDBAの想定

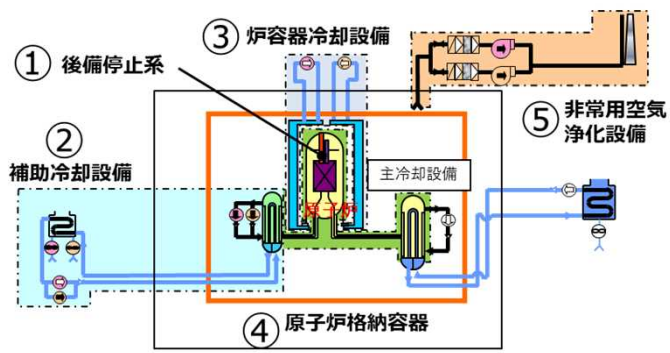
- 決定論的に、最も厳しい設計基準事故（1次系配管破断）発生時に安全設備の機能喪失を想定
- 加えて、自然現象（地震）による耐震Bクラス機器の機能喪失を想定

安全評価結果

- 燃料最高温度は、許容設計限度温度（1600℃）を上回ることなく、温度上昇による燃料損傷は生じない
- 炉心黒鉛の酸化量は、炉心の構造健全性維持の条件を満足
- 黒鉛酸化に伴い発生する可燃性ガス濃度は、燃焼範囲外
- 敷地境界における一般公衆の被ばく線量は、最大約3mS v

安全上の重要度分類の見直し

- 固有の安全特性に基づき、①～⑤について分類の見直しを実施。



重要度分類	HTTR建設時	新規制基準適合性審査での提案
安全上の機能別重要度分類	MS- 1	MS- 2
耐震設計上の重要度分類	Sクラス	Bクラス

緊急時活動レベルの見直し

- 固有の安全特性を考慮し、緊急時活動レベルの見直しを実施。

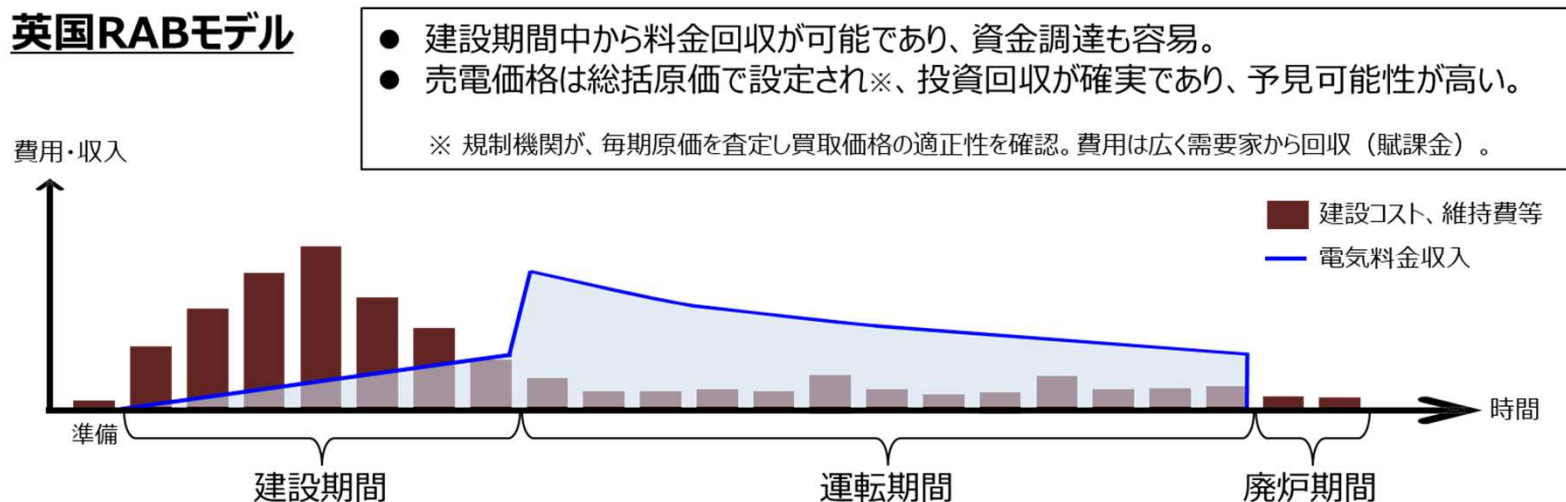
事象	変更前	変更後
原子炉運転中の非常停止が必要な場合に、原子炉の停止機能及び冷却機能を喪失する事象	GE	AL
使用済燃料に対する冷却機能の喪失	GE	AL
原子炉運転中に、燃料、1次系バウンダリ、原子炉格納容器の閉じ込め機能が全喪失	GE	SE

※緊急時活動レベル（EAL）：
AL（警戒事象）
SE（施設敷地緊急事態）
GE（全面緊急事態：屋内退避、場合によっては避難が必要）

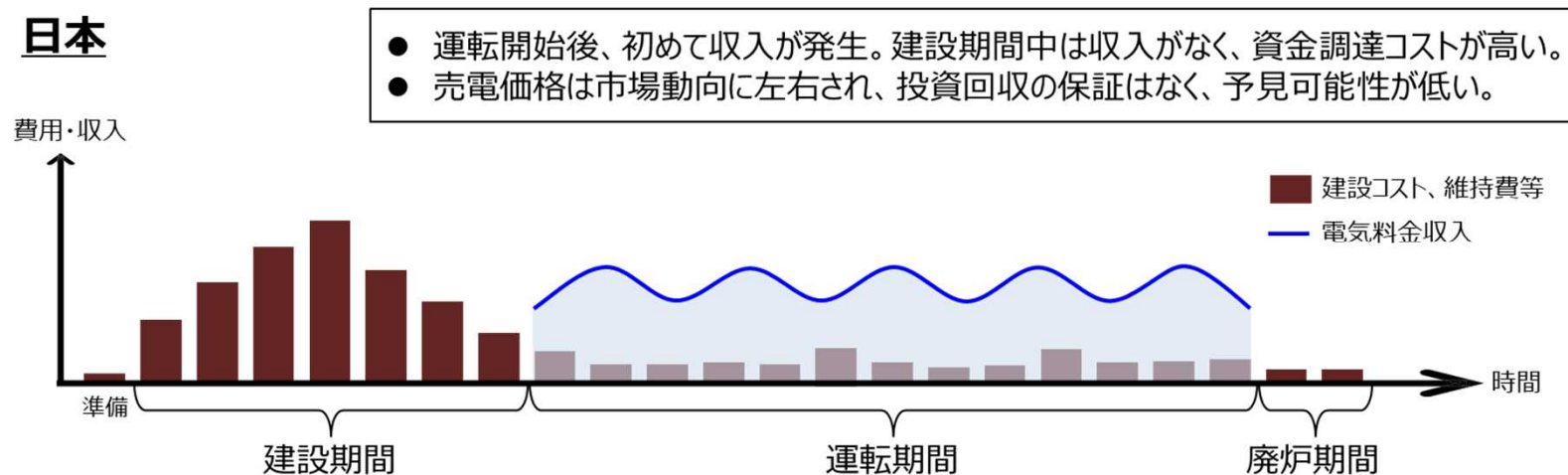
③ー8. ファイナンス：新設を巡る大型初期投資対策（英国RABモデル）

- RABモデルは、規制当局が認可した投資を、規制料金を通じて回収する仕組み。投資家のリスクに上限を定め、プロジェクト遂行困難時には、国が資金提供、又はプロジェクトを中止し補償金を支払う。建設期間においても投資回収が可能。（e.g. 英国下水道、空港ターミナル建設PJで実績あり）
- 中国が政府ファイナンスをバックに英国内建設における資本参加し、更には純国産技術で英国に原発を建設しようとしているところ、事業環境を整備し、英国内資本の参加を促すもの。

英国RABモデル



日本



③－ 9. ファイナンス：米国CWIP（未成工事）モデルについて

● CWIP（Construction Work in Progress）：

電力会社の資金調達負担の軽減を目的とし、建設中の新規発電所の資金調達コストを電気料金に上乗せして**建設期間中に回収**することを認めるもの

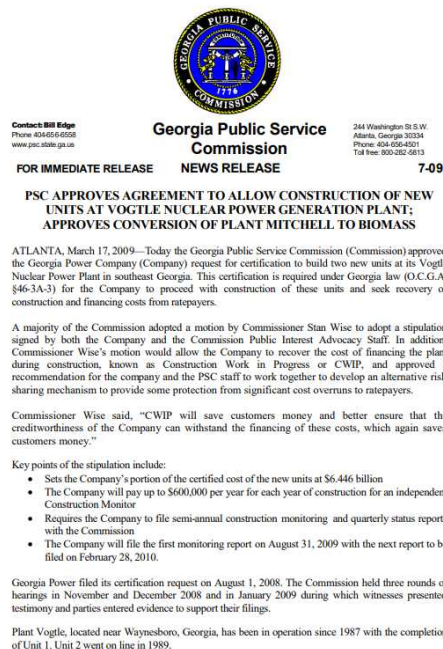
- 2009年、建設中のVogtle原子力発電所が立地するジョージア州の公共事業委員会（PSC）が、VogtleにおけるCWIPの採用をGeorgia Power社に承認。その他、サウスカロライナ州やフロリダ州でも承認※。

※対象例：・South Carolina Electric and Gas Company社のV.C.Summer 2,3(2012年にNRCからCOL取得、2019年にCOL終了)

・Florida Power and Light社のTurkey Point 6,7(2018年にCOL取得)

・Duke Energy Florida社のLevy Nuclear Plant 1,2(2016年にCOL取得、2018年に終了)

- 消費者コスト低減に資するという声がある一方で、工事の遅れやコストの上昇が消費者の負担を増加させるとする声も。



VogtleでのCWIPの適用を認めた
ジョージア州のPSCの書簡

ジョージア州PSC：

- CWIPは、**消費者のコストを低減**するとともに、**事業者の信用力がこれらの費用の調達に耐えられることをより確実にする**ものであり、**これもまた消費者のコストを低減**する。

Georgia Power社： (従来モデル)

- 従来**、電力会社は建設プロジェクトの資金調達費用コストを**プロジェクト完了後に回収**。
- 長い建設期間中**、材料や人件費のために**莫大な投資**と利払い費を含む**融資費用**が必要。
- この建設費と融資費は、発電所のライフサイクルにわたって消費者の料金に上乗せされる。

(CWIP モデル)

- Vogtleの建設費用回収計画では、CWIPを電気料金に含めることで、**消費者の孫利息 (interest on interest) 負担が軽減**される。
- 建設期間中の資金調達コストを回収することで、発電所の耐用年数にわたって**必要な総リターンが減る**。



③ー10. ファイナンス：新設を巡る大型初期投資対策（小型炉へのシフト）

- 米加仏等の諸外国では、新設を巡る大型初期投資対策として、初期投資の小さい小型炉へのシフトも検討。



ラファエル・マリアーノ・グロッシー IAEA事務局長

- SMRはより早く、より手頃な価格で建設でき、固有の安全性が高い。
- しかし、SMRや他の原子力発電所が建設されるためには、規制と融資の条件が整う必要がある。
- 例えば英国を含むいくつかの国は、規制と融資において革新的な答えを打ち出している。

（2022年の世界経済フォーラムへの意見記事）



カナダの電力会社

- SMRは、従来の原子力発電所に比べ、大量生産が安く、配備が容易。
- 各社の管轄区域において、SMRが経済的に競争力のあるエネルギー源となる可能性がある。



（Ontario Power Generation社、Bruce Power社、NB Power社、SaskPower社の共同FSの報告書）



米国 DOE 原子力局

- SMR は、従来の原子炉よりも建設費と運転費が安くなると予想される。
- 電力会社は、原子力を導入するためのより多くの選択肢を持つことができる。



（DOE 原子力局 戦略ビジョン（2021））



フランス

- マクロン政権は仏送電系統運用会社「RTE」に対し、2050年カーボンニュートラルに向けた電源シナリオ分析を要請し、RTEは2021年10月に結果を公表。
- 既存炉の運転延長、EPR2を14基建設（23GW）、SMR導入（4GW）を組み合わせ2050年の原子力比率を50%とするシナリオが、経済面で最も優位と結論。

③ー1 1. 廃炉：原子力事業を進めるための考慮要素

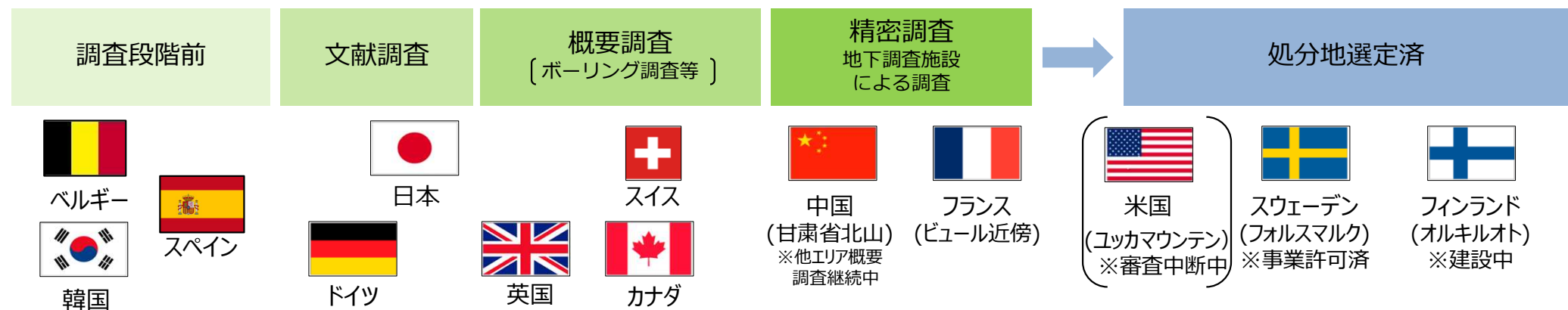
- 事業者が原子力事業を進めていくためには、建設のみならず、バックエンドのような原子力固有の課題も含めて、事業全体を俯瞰した対応が求められる。

諸外国の廃炉事業環境

	責任主体	実施主体	資金確保主体
 日本	原子力事業者 (電力会社)		※解体引当金制度
 米国	原子力事業者 (電力会社)	廃炉事業者 (民間エンジニア会社)	廃炉基金 ※事業者が金融機関への 積立義務を負う
 英国	国営 NDA(国営機関)	NDA(国営機関) が廃炉事業を統括	NDA(国営機関)
	民間 原子力事業者		廃炉基金 ※事業者が設立・積立の 義務を負う
 スペイン	ENRESA(国営機関)		

③ー1 1. 最終処分：原子力事業を進めるための考慮要素

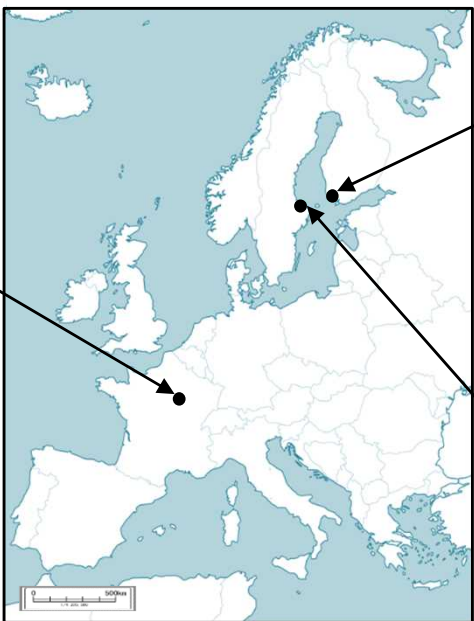
- 最終処分場の選定にあたっては、フィンランドやスウェーデンでは既に選定がされている一方、日本は文献調査の段階。



フランス (ビュール地下研究所近傍)



- ◆ ムーズ県とオート=マルヌ県の県境に立地予定
- ◆ 処分場建設予定地の主な6自治体 (約90km²) の人口は600 人程度、農業が主要産業



フィンランド (エウラヨキ)



- ◆ 人口：約9400人
- ◆ オルキオ原子力発電所が立地
- ◆ 原子力発電がエウラヨキ市の主要産業

スウェーデン (エストハンマル)

(注) 写真はSKB社作成イメージ図



- ◆ 人口：約22000人
- ◆ フォルスマルク原子力発電所が立地
- ◆ 沖合には群島が数多く広がっており、避暑地や観光地としても有名

1. 革新炉開発の課題の整理

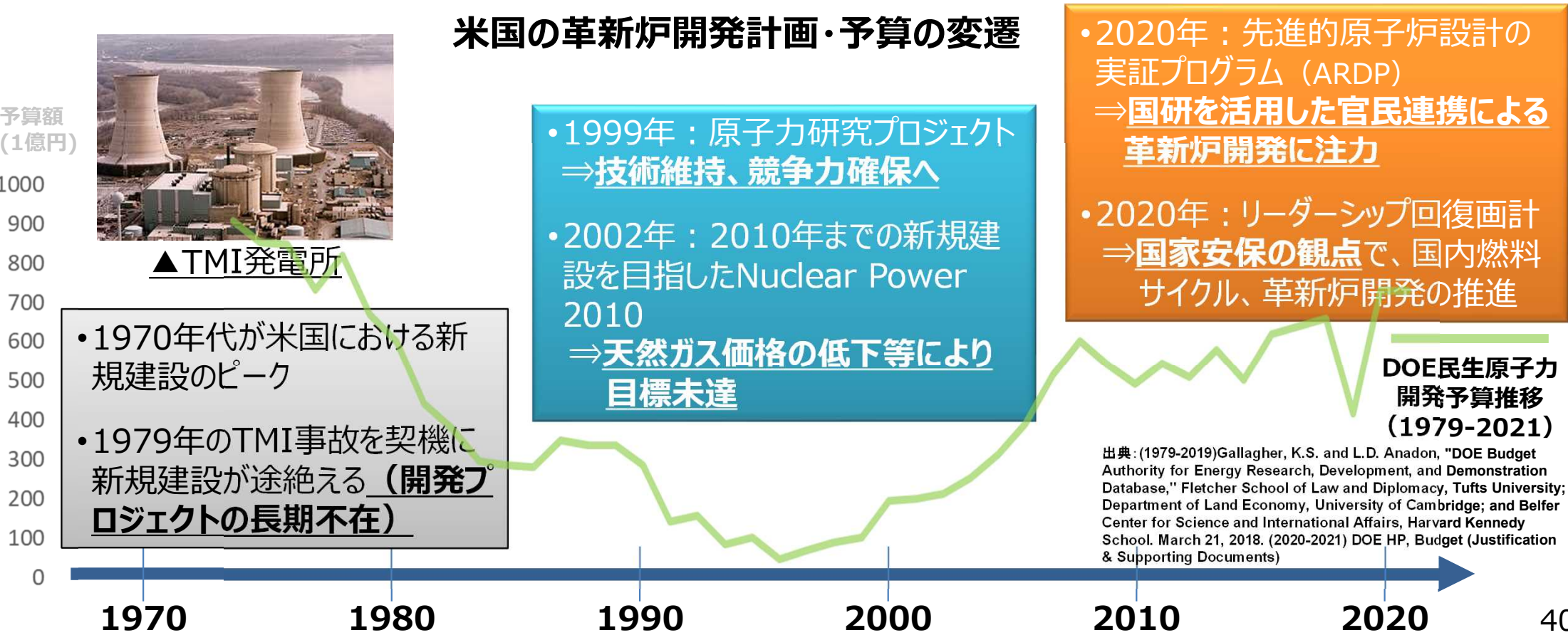
- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④**革新炉開発の体制の整備**
- ⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

④ー1. 体制：革新炉開発の体制（米国）

- 1970年代以降、原子力発電プラントの新規建設が途絶えていた米国では、国内の原子力技術の維持、国際競争力確保、世界におけるエネルギー・環境問題の主導権確保が課題に。
- DOE主導のもと、1999年から原子力研究プロジェクト（NERI）を開始し、2002年には2010年までの新規建設を目指した原子力2010計画（Nuclear Power 2010）が開始されたものの、天然ガス価格低下、東電福島第一原発事故後の原子力政策の不透明化などを理由に目標未達。
- DOEは2020年から、「先進的原子炉設計の実証プログラム（ARDP）」を開始し、国研を活用した官民連携による革新炉開発に注力。



④ー1. 体制：革新炉開発の体制（米国）

- 2015年より、DOEは国研施設・人材を活用した民間イノベーション支援（GAIN）を実施。
- 2018年、DOEによる民間支援をベースとした革新炉開発促進のための「原子力エネルギー技術革新対応法（NEICA）」を制定。2019年、DOE国研内に国立原子炉イノベーションセンター（NRIC）を設置。
- 2021年より、先進的原子炉実証プログラム（ARDP）を通じた民間支援による革新炉開発を実施。政府支援を呼び水に、民間投資資金が原子力スタートアップの流入。

国立原子炉イノベーションセンター設立（2018年）

- 民間イノベーション支援パイロットプログラムの成功 ※（GAIN、2015年～）を背景に設立。
- 民間企業（特にスタートアップ）による、国研の有する高度な試験設備の利用ニーズに応える。

※ スタートアップにとって、国研の施設・人材等はタイムリーな商用化に不可欠であり魅力的との評価。



先進的原子炉実証プログラム：ARDP（2021年～）

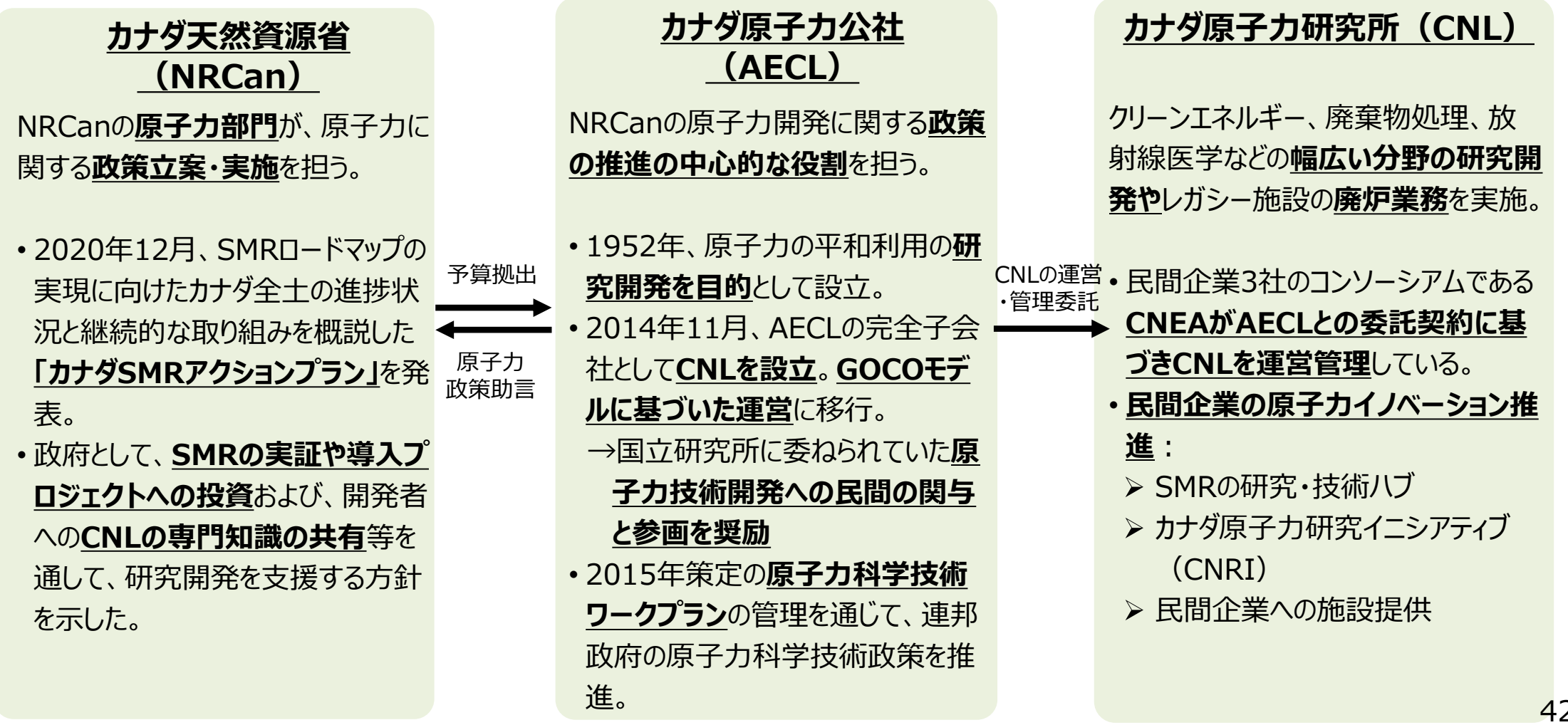
- 民間企業に対する大型予算措置を通じて、DOE国研の基盤施設等も活用し、革新炉の開発に必要な試験・実証・評価を支援。
- 2023年度予算からは、DOEの原子力エネルギー局(NE)の代わりにクリーンエネルギー実証局(OCED、2021年12月設立)がARDP実証炉プロジェクトを所管。
- OCEDは、バイデン政権のインフラ法に基づき設立され、クリーン水素、炭素回収、電力網規模のエネルギー貯蔵、SMRなどの分野で技術実証プロジェクトを支援。



<https://www.ans.org/news/article-3802/more-bigtech-billionaires-backing-nextgen-nuclear-startups/>

④ー 2. 体制：革新炉開発の体制（カナダ）

- カナダ天然資源省（NRCan）の原子力部門が原子力の開発に関するカナダの**政策を立案**。
- NRCanの政策はカナダ原子力公社（AECL）によって推進されるが、研究開発はカナダ原子力研究所（CNL）が担っており、AECLはプロジェクトファシリテーターに徹している。
- CNLは、革新炉開発の他にも**幅広い分野の研究開発**や**レガシー施設の廃炉業務**等も抱えている。
- GOCOモデルにより**原子力技術開発への民間セクタの関与と参画を奨励**。



【参考】GoCoモデル

- カナダの原子力分野における国際競争力向上やイノベーション促進のため、民間による国立研究所の利活用促進を目的として、連邦政府が研究施設を所有し、民間が運営する官有民営（Government-owned, Contractor-operated: **GoCo**）モデルが導入された。
- GoCoモデルでは、**AECLはサイト、施設、資産、知的財産を所有し、環境修復と放射性廃棄物管理**の責任を負っている。
- **CNLが、サイトの日常業務を担当**している。

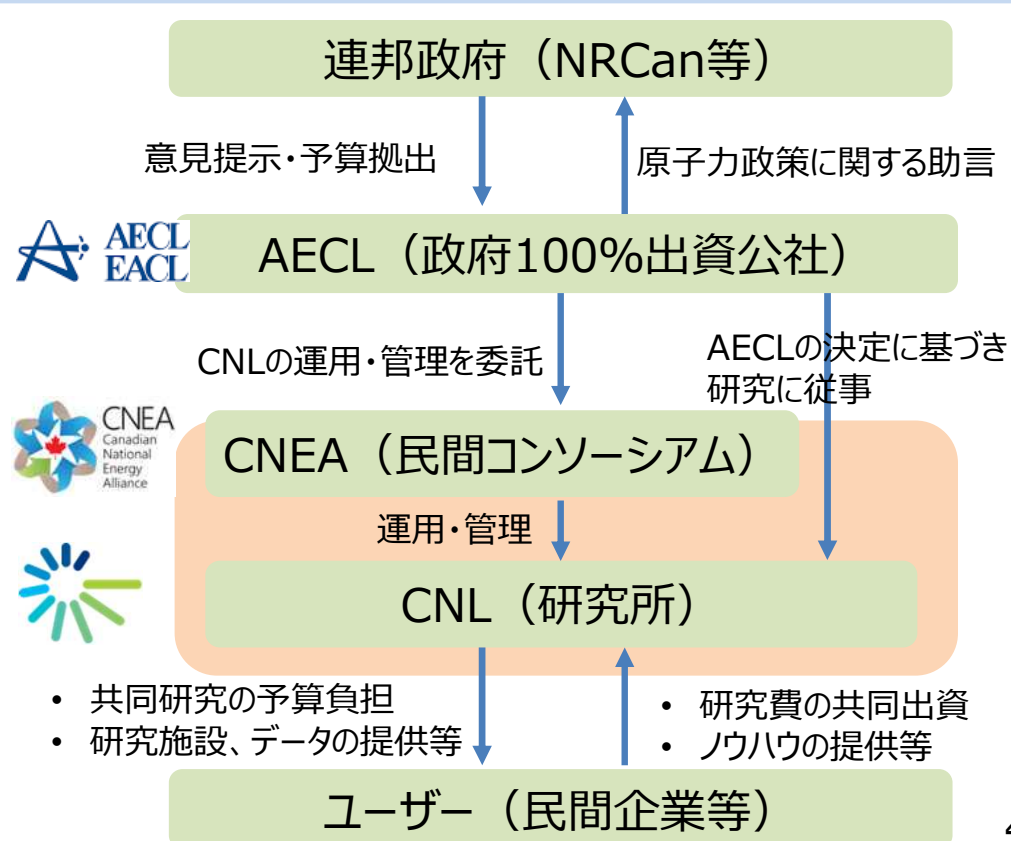
制度設立の経緯

- かつてのカナダの原子力技術開発は国立研究所（当時のAECL）に委ねられていた。
- 2007年、カナダ政府のカナダ科学技術戦略では、研究開発部門における民間セクタへの関与と参画が奨励され、その一環としてAECLの再建が盛り込まれた。
- 2014年 11月、GoCoモデルへの移行に向けて国立研究所を民営化し、CNLを設立。
- 2015年 6月、政府は**CNLの運営を担う民間組織**として、**民間企業をメンバーとするコンソーシアム**、（Canadian National Energy Alliance : **CNEA**）を選定。

2021年度予算

- **AECLの主な収入源は政府の財政支援**であり、2021年度の収入は9億4100万カナダドル（約941億円）
- AECLの2021年度支出の内、**CNLへの委託費用**は2億1300万カナダドル（約213億円）

GoCoモデルの運営



④ー3. 体制：革新炉開発の体制（英国）

- 国立原子力研究所（NNL）は、BEISの予算委託を受けて、施設、重要な技術、技術革新に関する研究開発を実施しており、交付金を受けていない。
- エネルギー安全保障戦略の中で新規建設を支援する政府機関「Great British Nuclear」を設立することを掲げる。

BEISとNNLの関係

- NNLは、政府が所有・運営する公社で、BEISの予算委託を受けて、施設、重要な技術、技術革新に関する研究開発を実施しており、交付金は受けていない。

- 1960～70年代、改良型ガス冷却炉（AGR）を開発。
- 1970年代後半、AGRの次の世代の炉型として、国産の重水減速沸騰軽水冷却炉が有力候補となっていたが、結局は経済性で勝るとみなされた米国WH社のPWRが採用。
- 1979年のTMI事故や1986年のチェルノブイル事故、及び1990年以降の電力民営化の影響で、原子力開発に対して、積極的な政策は取られなかった。
⇒ AGR開発以降の50年間、炉型開発について国家プロジェクトを実施してこなかった。

近年、エネルギー・セキュリティの確立、低炭素経済への移行及び国際的な気候変動対策の取組みへの注目が高まる。

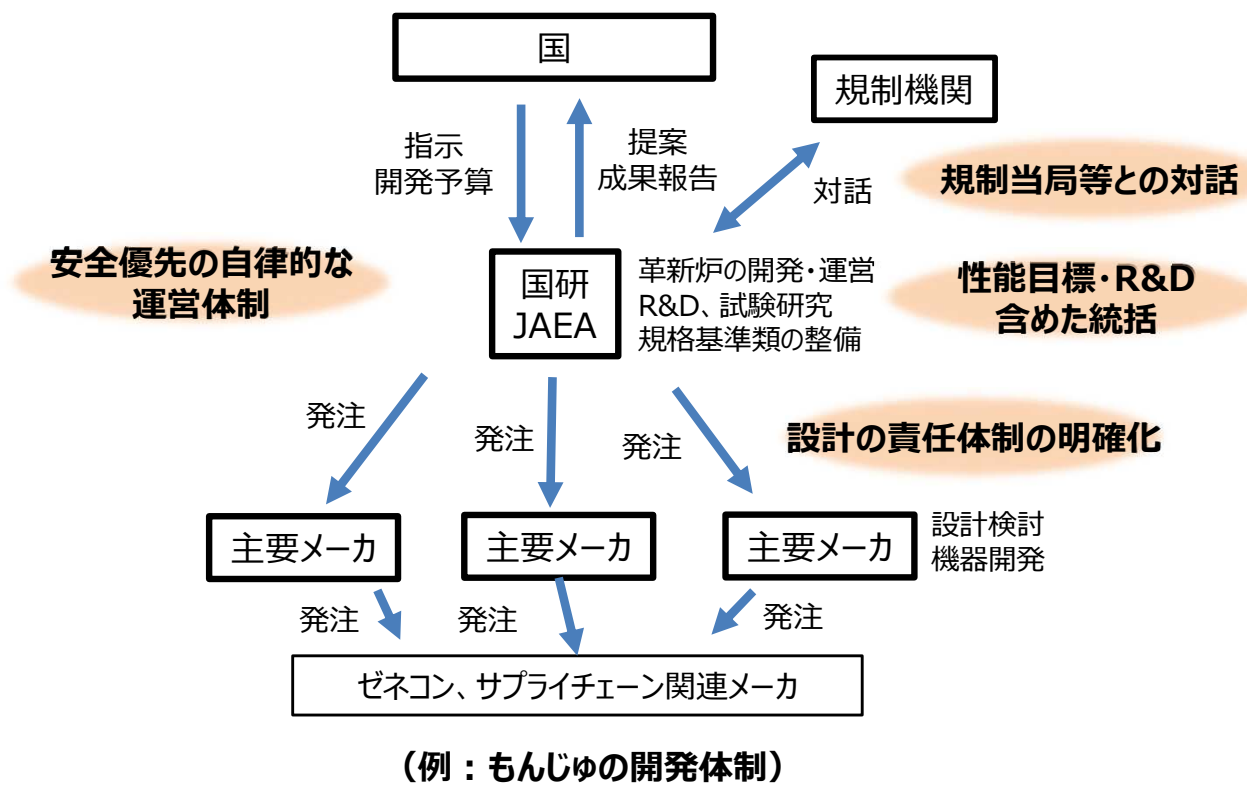
カーボンニュートラルを目指す上で原子力開発の必要性を再認識

2022年4月：「エネルギー安全保証戦略」		
	戦略での方策	
	2022年末の目標	● <u>政府機関「Great British Nuclear」を設立</u> ● 「将来の原子力開発を可能にするための基金（Future Nuclear Enabling Fund）」を設置
	2023年の目標	● さらなる原子力プロジェクトの選定プロセスの開始
	2024年の目標	● 原子力プロジェクトの最終投資判断（FID）
	2030年の目標	● 最大8基の建設計画を進展
	2025年の目標	● 最大24GWの原子力設置（英国の全需要の最大25%供給）
● クリーンかつ安価な国産エネルギーの開発を大幅に加速し、英国のエネルギー自給を長期的に改善する戦略		
● 原子力を「国内総電力量の約15%を安定的に供給する必要不可欠な電源であるとともに、間欠性の高い再生可能エネルギー源を補う存在」と位置付け		
● 2022年内に、 <u>新しい政府機関として「Great British Nuclear」を立ち上げ</u> 、新設プロジェクトの投資準備や建設期間中の支援が可能になるよう、同機関に十分な予算措置を講じる。		

④ー4. 体制：革新炉開発の体制の不備（日本）

- 過去の国研を中心とした開発においては、「護送船団方式」が取られており、**システム全体の設計を一貫性をもって実施する責任体制の明確化**が課題であった。システム全体の設計を明確な責任体制の下実施するため、高速炉実用化研究開発及び経済産業省の高速炉委託事業において、**エンジニアリング機能を集積する中核メーカーの設定**が行われた。
- 他方、設計に限らず、**R&Dの進捗を含め開発の全体を統括し、技術的側面以外にも社会的側面**についても**適切にリソース配分を実施しながら効率的に開発を推進するプロジェクトマネジメントの機能強化**も必要。

過去の開発体制の課題



過去の開発体制からの教訓

プロジェクトマネジメント機能の強化

- 技術的側面：
 - ・ システム全体の設計の統括
 - ・ 経済効率的な開発を目指しつつ、性能目標の達成度・R&Dの進捗含め開発の全体を統括
- 社会的側面：
 - ・ 安全優先の自律的な運営体制の構築
 - ・ 規制との対話の強化
 - ・ 情報発信・情報公開の徹底
 - ・ 地元との共生の重視

【参考】国立研究開発法人の体制

- 国立研究開発法人によって、自らが中心となり研究開発を行う法人と、ファンディングエージェンシーとして民間事業者に資金配分を行う法人と体制が分かれる。

国立研究開発法人：

公共上の事務等であって国が自ら主体となって直接に実施する必要のないもののうち、民間の主体に委ねた場合には必ずしも実施されないおそれがあるものを効果的・効率的に行い、我が国における科学技術の水準の向上を通じた国民経済の健全な発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人

<研究開発型>

- 日本原子力研究開発機構（JAEA）
- 理化学研究所（RIKEN）
- 物質・材料研究機構（NIMS）
- 量子科学技術研究開発機構（QST）
- 宇宙航空研究開発機構（JAXA）
- 産業技術総合研究所（AIST）
- 国立環境研究所（NIES）

※JAEAは以前はプロジェクト実施主体（動力炉・核燃料開発事業団）と研究開発主体（日本原子力研究所）に分かれる。

<資金配分型>

- 日本医療研究開発機構（AMED）
- 科学技術振興機構（JST）
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

<研究開発・資金配分型>

- 農業・食品産業技術総合研究機構（NARO）

【参考】JAXAの国研発ベンチャーの取組

- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、科学技術・イノベーション創出の活性化等による知識・人材・資金の好循環の構築を目的として、JAXA発ベンチャーの認定・支援制度を創設。
- 2015年より、既に9つのJAXAベンチャー認定企業が創立。

科学技術・イノベーション創出の活性化に関する法律の改正（令和3年～）

JAXAを含む5法人（NIED、JAMSTEC、JAEA、NIES）において、法人発ベンチャー等への出資が可能に。

中長期目標の変更（平成30年～）

○出資等の業務に関する記載の追加

民間活力活用促進のため、「科学技術・イノベーション創出の活性化に関する法律」（平成20年法律第63号）に基づき、JAXAの研究開発の成果に係る成果活用事業者等に対して、出資並びに人的及び技術的援助の業務等を行うことで、JAXAの研究開発成果を活用する事業創出及びオープンイノベーションを喚起する取組を強化するとともに、ベンチャー企業や異業種企業を含む宇宙産業への参入促進、事業化の加速及び宇宙産業の競争力強化等に取り組み、宇宙産業の拡大及び宇宙産業を担う人材の育成にも貢献する。

JAXA認定ベンチャー	
企業名	事業概要
合同会社パッチドコニックス	エネルギーマネジメントソリューション提供、小型星等向け推進機関の開発提供
合同会社Flow Sensing Lab	超音波流量計測技術と用いた流量計測に関する受託研究、技術コンサルティング等
合同会社Space Cubics	宇宙用コンピュータ設計検証ノウハウを活用した宇宙用民生コンピュータの開発・販売
株式会社DATAFLUCT	衛星データおよび衛星データ利活用に関する知見を用いた商圈分析＆不動産価値算定
株式会社天地人	衛星リモートセンシングデータとその分析技術・ノウハウを用いた土地評価サービスの提供
武蔵スカイプラス株式会社	小型無人航空機を用いた、多様な空間データを取得するサービス
SEESE株式会社	環境試験ワンストップサービスを始めた宇宙開発を支援する各種サービスの提供
オリガミ・イーティエス合同会社	構造設計・構造解析およびそれらに関わるコンサルティング等のサービス提供
株式会社ツインカプセラ	断熱保冷保温容器等の企画・開発・製造・販売および関連するコンサルティング等

1. 革新炉開発の課題の整理

- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④革新炉開発の体制の整備
- ⑤サプライチェーンの維持・強化**

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

- ⑤- 1 海外の原子力サプライチェーンの現状と戦略
- ⑤- 2 国内の原子力サプライチェーンの分析
- ⑤- 3 国内原子力産業による海外市場への参画ポテンシャル

⑤－1．世界の原子力市場は今後大きく拡大する見通し

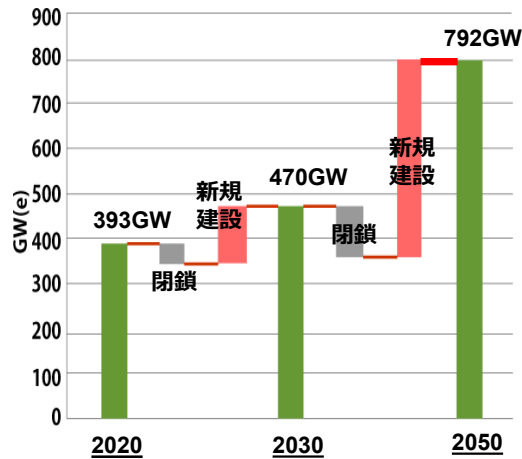
- 国際機関の分析によると、原子力の市場規模は、**2050年には最大で年間約40兆円程度まで拡大**。そのうち、**アジアの旺盛な需要拡大**に應える伸び（石炭からのリプレイス等）が太宗を占める。
- **非従来型炉のシェアは、2050年で市場の1/4規模との予測**（当面は革新軽水炉が需要増を満たす構図。）

IAEA（国際原子力機関）

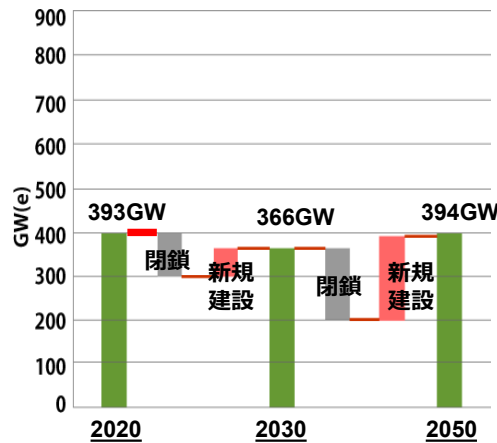
世界の原子力設備容量予測

単位：GW=100万kW

【高予測：各国で温暖化対策を拡充】



【低予測：各国の政策が現状維持】

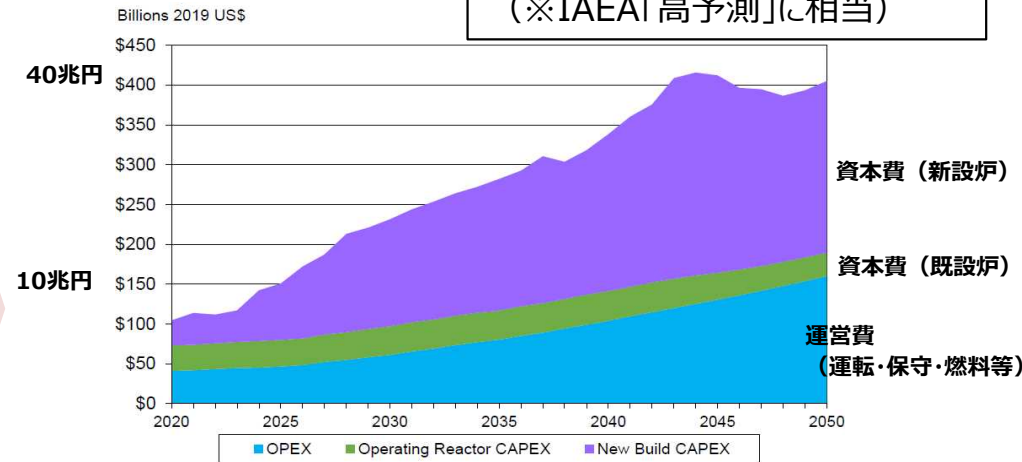


NEI（米国原子力エネルギー協会）による非従来型炉の市場規模予測

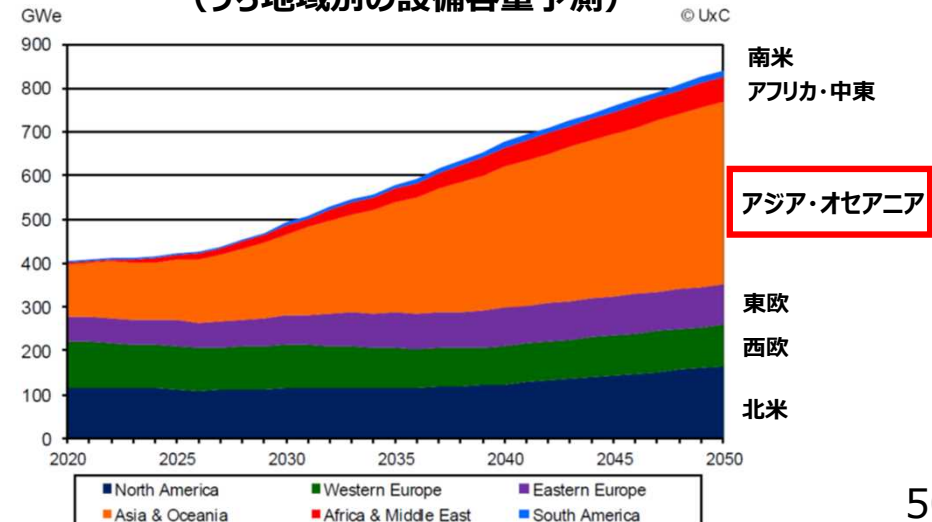
「SMR、マイクロ炉、高温ガス炉、溶融塩炉等の非従来型炉が、より市場に浸透していけば、これら非従来型の炉は、2050年の市場において、最大で25%程度を占める可能性がある」

NEI（米国原子力エネルギー協会）

世界の原子力市場予測
（※IAEA「高予測」に相当）



（うち地域別の設備容量予測）



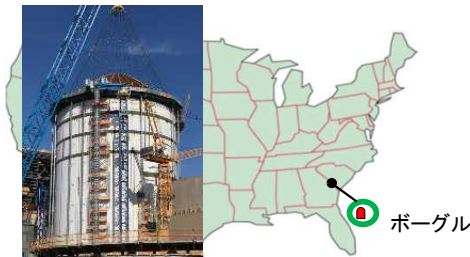
⑤ – 1. 米国の原子力サプライチェーンの状況

- 米国は長期にわたり、原子力発電所の新設が行われなかった結果、原子炉容器等の主要機器製造能力を喪失し、日韓等の輸入に依存。燃料、ポンプ、バルブ等については、国内にサプライチェーンを維持。

圧力容器、大型鍛造品等の主要資機材の製造能力を喪失

- スリーマイル原子力発電所の事故以降新設案件なし。35年ぶりの新設着工原発として、ボーグル発電所3・4号機を、2013年に建設開始。建設管理や資機材品質の確保等に苦慮し、工期・費用ともに大幅増。
- 原子力規格の所有事業者は、600社（1980年）から200社以下（2007年）に大幅減。
- 米国エネルギー省は、国内に主要資機材（原子炉容器、蒸気発生器、大型鍛造品等）製造能力はないと評価。
- 主要資機材を日韓等の海外から輸入する一方、燃料、ポンプ、バルブ等については、国内にサプライチェーンを維持。

炉型	PWR (WEC AP1000)
出力	110万kW×2基



米国 AP1000	
構成機器	サプライヤ名
エンジニアリング	Shaw Group【米】 BECHTEL【米】
原子炉容器	Doosan【韓】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
格納容器・建屋	Bechtel【米】、Newport News Industrial【米】、IHI【日】
ポンプ	Curtiss-Wright（1次系）【米】 Hayward Tyler【米】 Gardner Davis Nash【米】 Flowserve【米】
バルブ	Georgia Transformer【米】 Enertech【米】 Crane Nuclear【米】 Chromalox Inc.【米】
蒸気発生器	Doosan【韓】
蒸気タービン	東芝ESS【日】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
燃料	Westinghouse【米】

⑤ – 1. 米国の原子力サプライチェーン戦略

- 米国は、炉型開発はSMRに注力し、将来の海外市場の獲得を狙うとともに、サプライチェーン内で技術的強みがあり、エネルギー安全保障上重要な燃料分野に重点投資。

今後の炉型選択とサプライチェーン戦略

- 原子炉容器、蒸気発生器等の大型機器の製造能力を失っており、軽水炉、高速炉、高温ガス炉等の小型炉に注力。
- 今後は、自国で製造できない大型鍛造品等は他国から調達し、また、自国に技術的な強みのある燃料技術については、HALEU等の新燃料開発、既存炉の燃料の自給率向上支援を実施。

NuScaleに対する支援

2013年以降、DOEを通じ、NuScaleの研究開発に対し、約5.3億ドルの支援。さらに、実証炉の建設に向け、13.55億ドルの支援を表明。また、カナダやルーマニア、ポーランド、英国等の欧州諸国に対しMOUを締結

米国先進原子炉実証プログラム（ARDP）

SMRやその他先進炉の実証に向けた技術開発や概念設計に6年間で32億ドルの資金提供を実施

例) 実証炉 2 基に対する資金支援
約2,000億円 約1,200億円



ナトリウム冷却高速炉 Natrium
TerraPower社



高温ガス炉 Xe-100
X-energy社

原子力エネルギーサプライチェーン戦略

ATF（事故耐性燃料）、HALEU（U235濃縮度5～20%の低濃縮ウラン）、TRISO（高温ガス炉用燃料）等の新型燃料に係るR&Dへの財政支援、HALEU濃縮実証プログラムの完遂への支援を表明

民間原子力クレジット（CNC）プログラム

老朽化した炉に対し、5年間で60億ドルの資金提供を実施。米国製の燃料の利用率が高いほど、優先的に支援が行われる仕組み。間接的に燃料の自給率向上を促進

⑤ – 1. 英国の原子力サプライチェーンの状況

- 長期間の建設期間の空白により、原子力の国内技術・ノウハウを喪失。国内の革新軽水炉建設の際は、原子力固有の機器の多くは、仏国を初めとする海外のサプライチェーンに依存し、ポンプ等の一部機器のみ国内生産。

革新軽水炉のサプライチェーンを他国に依存

- 2013年のサプライチェーン評価では、原子炉容器、蒸気発生器・タービン、大型鍛造品、一次冷却材ポンプが供給できないと評価。
- 2019年より、30年ぶりの原子力発電所の新設案件として、フラマトムのEPRを採用したヒンクリーポイントCの建設を開始するも、英国は国産の原子炉メーカーを保有しておらず、建設の際には仏国を初めとする海外のサプライチェーンに依存。



ヒンクリーポイントC

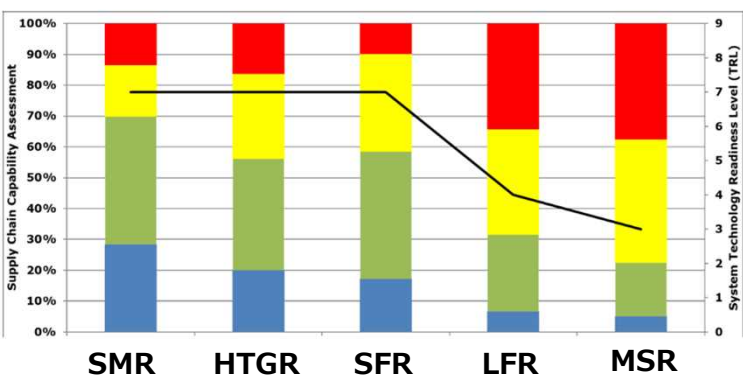
英国 EPR	
構成機器	サプライヤ名
エンジニアリング	EDF SA【仏】
原子炉容器	Framatome【仏】 クルゾ・フォルジュ【仏】(鍛造品) 日本製鋼所M&E【日】(鍛造品)
格納容器・建屋	Bylor【英】
ポンプ	Selwood【英】 SPX FLOW【米】 三菱重工【日】
バルブ	Velan【加】 KSB【独】
蒸気発生器	Framatome【仏】 日本製鋼所M&E【日】(鍛造品)
蒸気タービン	アルストム・パワーシステムズ
燃料	Springfields Fuels【英】 FANP【仏】

⑤ – 1. 英国の原子力サプライチェーン戦略

- 次世代炉は、ガス炉の経験や原子力潜水艦の技術蓄積を活かし、高温ガス炉・SMRに注力し、自国サプライチェーン比率の上昇を狙う。
- 今後の国内革新軽水炉の新設において、国内の機器・部素材の製造能力増強を支援し、自国からの調達比率を高める方針。

今後の炉型選択とサプライチェーン戦略

- 2020年、英国国立原子力研究所が、高温ガス炉、ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却原子炉、熔融塩炉といった新型炉のサプライチェーン評価を実施。
- 特に、SMR・高温ガス炉の機器供給においては、自国で製造できるようになる期待があるとして、今後はSMR・高温ガス炉に注力するとの見方も。



英国国立原子力研究所のサプライチェーン評価

制御棒や制御棒駆動装置、スクラムシステム等についてはどの炉型についても、製造できないと評価

左からSMR、HTGR:高温ガス炉、SFR:ナトリウム冷却高速炉、LFR:鉛冷却原子炉、MSR:熔融塩炉

赤：i) 能力を評価するのに情報が十分でない、 ii)現在の英国のサプライチェーンには必要な製造能力がない

黄：サプライチェーンは、必要な機器を製造することができる可能性があるが、いくつかの主要なギャップあり

緑：サプライチェーンは近い将来、必要な機器が製造できるようになると期待されるが、いくつか小さなギャップあり

青：現在のサプライチェーンでも製造能力あり

出典)NNL, "Identification of potential opportunities for development of UK R&D capability and strategic UK supply chain to the deployment of Advanced Modular Reactors",2020.

先進原子炉基金

国内のSMRと高温ガス炉の開発に対し、研究開発資金を投入。原子力潜水艦のノウハウを持つRolls-Royceに2.1億£を投入し、研究開発を推進。また、ガス炉の蓄積のある高温ガス炉に1.7億£投入し、研究開発を推進。

未来原子力実現基金

英国での革新軽水炉の新設の機会に際し、自国産比率向上のための機器・部素材の製造能力増強等を支援。
(2022年内にも交付開始)

⑤ – 1. 仏国の原子力サプライチェーンの状況

- 仏国は、フィンランドや英国での建設経験を通じ、燃料、原子炉容器、ポンプ等の広範な原子力サプライチェーンを維持。圧力容器・タービンの部材となる大型鍛造品についてのみ日本から調達。

広範な原子力サプライチェーンを維持

- 1993年着工のシボ-2号機以来14年ぶりの新設着工原発として、EDFは、2007年より、フラマンビル原発3号機を建設開始。
- 燃料、原子炉容器、ポンプ等の主要資機材をフランス国内のサプライチェーン（フラマトム、クルゾ※等）でまかなう。
- クルゾの加工可能重量の上限以上の大型鍛造品については、JSWから調達。
- EDFは、2015年にGEに売却したアルストムの原子力事業を買い戻し、タービンのサプライチェーンも内製化する見込み。
※フラマトムの子会社

大型鍛造品の供給能力

サプライヤ名	最大加工重量 (t)
日本製鋼所【日】	670
斗山重工【韓】	540
中国第一重型機械集団【中】	600
OMZ Izhora【露】	600
<u>クルゾ【仏】</u>	<u>500</u>

大統領演説「原子力の復活」



仏国 EPR	
構成機器	サプライヤ名
エンジニアリング	EDF【仏】
原子炉容器	Framatome【仏】 クルゾ・フォルジュ【仏】（鍛造品） 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
格納容器・建屋	Bouygues【仏】
ポンプ	Framatome（1次系）【仏】 アルストム・パワーシステムズ【仏】
バルブ	アルストム・パワーシステムズ【仏】
蒸気発生器	Valinox Nucleaire【仏】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
蒸気タービン	アルストム・パワーシステムズ【仏】
燃料	FANP【仏】

⑤ – 1. 仏国の原子力サプライチェーンの戦略

- 仏国は国内建設期間の空白による機器製造や溶接等の現場技能の低下の指摘を受け、製造業や現場の技能人材等の強化に大規模な支援。
- 国内では14基の革新軽水炉の建設方針を表明しており、国内建設での教訓や高い自給率を活かし、他国への海外展開を図る。

今後の炉型選択とサプライチェーン戦略

- フラマンビルでの原子炉容器上蓋の鋼材異常や冷却系配管の溶接不良等が発覚。原因分析を政府・EDFがPSA元会長に諮問。
- マクロン大統領が最大14基の国内建設を行うことを宣言。今後は海外展開を視野に革新軽水炉の国内建設に注力する。

- 答申の中で、「新規着工のない15年の間にEDFのプロジェクトマネジメント能力や部品メーカーの製造能力が低下し、特に溶接の技術や人材を喪失した」との指摘。



仏政府による資金注入

2017年以降、84%の株式を保有しているフランス政府から、原子力事業立て直しのため、EDFに約30億ユーロの資本注入。

Excell Plan

2019年には、EDFは、現場人材やプロジェクトマネジメントの強化のため、1億ユーロの投資を決定。EPR2建設に必要なサプライヤの資格取得への資金支援や、原子力職業学校や溶接学校の設立等に出資。



フランス復興計画

中小企業の技術維持・設備投資に対する支援を行い、既に合計136件のプロジェクト、総額1.5億ユーロの支援を決定。あわせて、SMRや燃料サイクル、放射性廃棄物低減に資する炉型への研究開発も支援。

GEタービン事業買収

仏国内で建設を予定しているEPR2での採用を想定し、EDFは、GEよりタービン事業を買収し、製造能力を強化。

海外企業との協定の推進

EDFはチェコやポーランド、インドなどの複数の大手関係企業と協力協定を締結。

⑤－1．韓国原子力サプライチェーンの状況と関連する政策

- 1970年代以降、アメリカから技術移転し、国産化を推進。斗山重工を頂点とする燃料、原子炉容器、ポンプ等の広範な自国原子力サプライチェーンを確立。
- 前政権の脱原子力政策により原子力産業は疲弊するものの、政府による海外輸出支援策により一定の製造機会を獲得。

海外輸出を通じて強固なサプライチェーンを温存

- 2017年からの5年間で脱原子力政策を掲げたことにより、サプライチェーンの収益悪化、発電事業者・プラントメーカー併せて合計約1,300人の人材流出、約600名の原子力専攻学生の中退など、原子力産業の疲弊が進展。
- 官民をあげて、プラント・原子力機器の輸出を積極的に推進し、自国内に強固なサプライチェーンを維持。

UAE（バラカ①～④）

韓国輸出入銀行からの100億ドル融資の後押しを受け、韓国電力公社がEPCを受注。韓国軍によるUAEへの軍事的支援（特殊部隊の派遣等）も受注に寄与。2021年に1基が運転開始し、2024年までには他3基も運転開始予定。

エジプト（エルダバ①～④）

韓国水力原子力公社（KHNP）、斗山重工等は砂漠での原子力発電所の建設経験がある唯一の事業者として、ロシアが受注したエルダバPJのタービン建屋等の二次系統事業に、エジプトのペトロジェット社と共に参画。

- 2022年5月に発足した尹政権では、原子力積極利用・新設再開の方針。

今後の炉型選択とサプライチェーン戦略

- 国内での大型軽水炉の建設の継続・新設再開、官民の連携による積極的なプラント・海外機器輸出を通じ、サプライチェーンの強化を図る。
- 今後は、SMR海外市場を有望視。

官民でのトップ外交の推進

チェコ首相と韓国大統領の会談を受け、韓国原子力企業連合とチェコ企業によるMOU締結を実現。KHNP社長は、ルーマニア政府を訪問し、韓国中小企業による資機材約1億円分を獲得。

中小サプライヤの輸出を支援

官民でのサプライヤの国際シンポジウム参加への支援、輸出支援ポータルサイトによる海外の原子力発電所プロジェクトの情報提供、市場調査等を政府（総額47.9億ウォン）。51%国資本のKEPCOの子会社であるKHNPは、中小企業向けの海外認証取得を支援。

SMR研究開発支援

SMRに対し、2023年からの6年間で、研究開発に対して約420億円を支援することを表明。

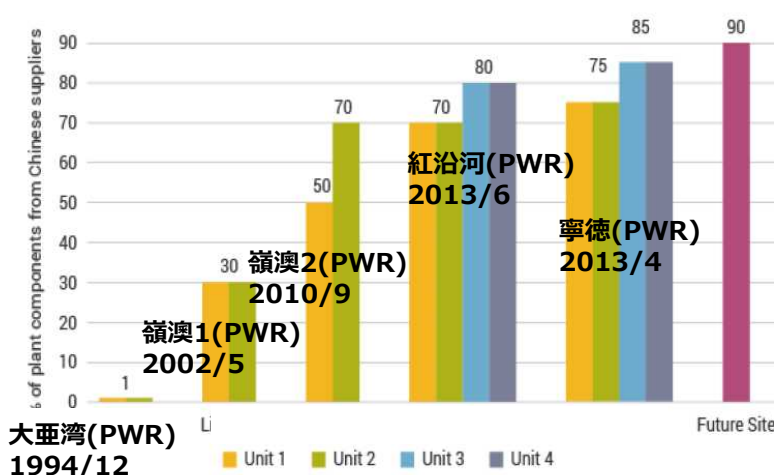
【参考】中国の原子力産業と海外展開

- 欧米諸国に先駆け、革新軽水炉（AP1000、EPR）等の建設、運転開始を実現。 国産炉型である華龍1号も開発・実装済。重工メーカーは、『主要設備は既に100%近い国産化に成功』と発表。政府による強力なファイナンス支援で海外展開を推進。

中国のサプライチェーンの状況

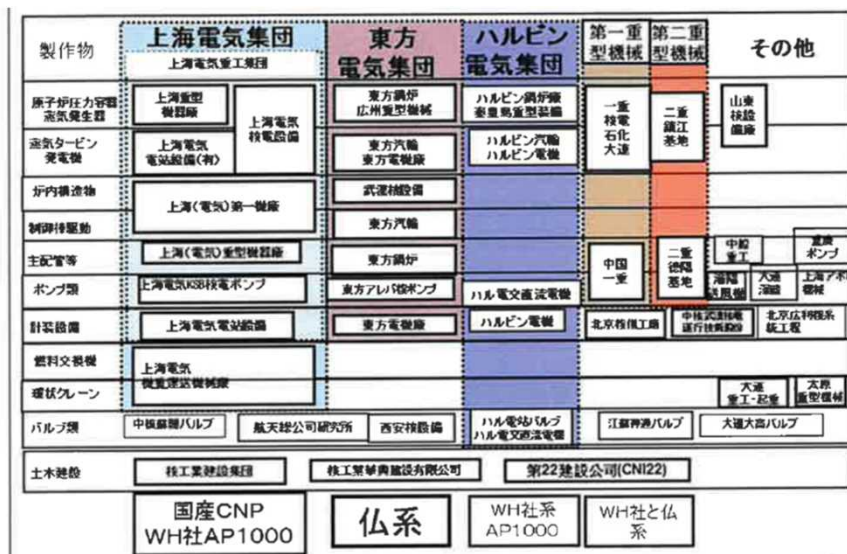
- 中国国内で建設される原子炉の国産化率は、2010年以降着実に向上。中国重工メーカーは、『主要設備はほぼ100%の国産化』を達成と発表するも、ポンプ、バルブ等の国産実績が少なく、引き続き、Curtiss-Wright等米国企業に依存しているとの指摘も。

中国の主要プラントにおける国産化率の推移



出典) U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, "America's Supply Chains"

中国の三大重工メーカーのサプライチェーン



出典)各社公表情報及びヒアリング

中国の輸出戦略

- パキスタン・チャシュマ3、4号機やカラチ発電所の建設中の2基（華龍1号）について、中国輸出入銀行（中国の国営政策投資金融機関）が、ベンダー側の費用の82%をファイナンスしているとの指摘も。
- 輸入国へのファイナンス支援割合（50%まで）や頭金・金利・償還期間等に関するOECD輸出信用アレンジメントのルールに拘束されずに、ファイナンス支援することが可能。

【参考】ロシアの原子力産業と海外展開

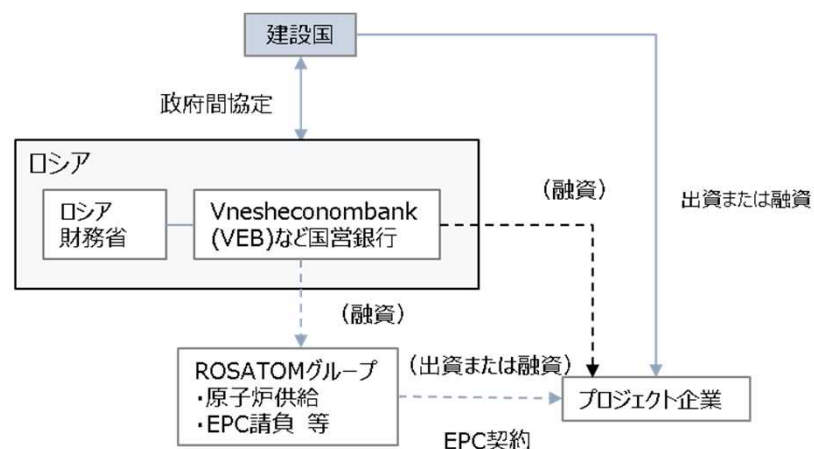
- ロシアでは、ROSATOM国営原子力会社の下にすべての原子力関連企業が集積。民生用原子力部門を統括する企業体アトムエネルゴプロム（AEP）社があらゆるサプライチェーンを自社で保有し、海外含むVVERの設計・建設を一手に引き受け。
- 強力な政府ファイナンスを武器に、燃料供給・法規制整備とのパッケージ支援、導入国現地企業への発注と組み合わせ、新興国輸出にも成功。

ロシアの輸出ファイナンススキーム

- ✓ 東欧では建設費用の80%以上に対し、ファイナンス付与、フィンランド（※1）やトルコでは、BOOスキーム（※2）による建設費用の負担を行い、受注を後押し。
- ✓ 中国同様に、OECD輸出信用アレンジメントのルールに拘束されずに、ファイナンス支援することが可能。

※1 2022年5月に建設許可の申請を取り下げ。

※2 ロシアがEPC及びその後の発電所の運営全てを請負うスキーム。



ロシアの海外展開戦略

- ✓ ROSATOM社は、中東、アフリカ、アジア、中南米の原子力に対し、法規制整備から廃止措置までの全てのプロセスを包括支援する「統合ソリューション」を提案。
- ✓ トルコ・アックユの建設では、建設費の35～40%を現地企業に発注するなど導入国の産業創出にも寄与。
- ✓ ロスアトムの電力・安全センター長を務めるプロコフ氏は、「当社（ロスアトム）にとって近年の主な収入源は、核燃料供給とウラン濃縮関連サービス。これらのビジネスが海外売り上げの約40%を占めている。」と発言しており、プラント単価を削減しつつ、燃料事業で収益を確保しているとの見方も。

⑤ – 1. 各国のサプライチェーン戦略と支援策について①

- 米英は長期間の建設期間の空白によりサプライチェーンが脆弱化。軽水炉サプライチェーンの状況を踏まえ、米国は高速炉含む小型炉の開発・実装、英国は高温ガス炉・軽水炉SMRといった新型炉型を選択し、市場の主導権を獲得すべく大規模な投資を開始。
- 米国は国内燃料開発、英国は国内の機器製造能力増強を通じ、自国の強みや弱みをサプライチェーン支援に反映。

国	各国の炉型選択とサプライチェーン戦略	支援策
米国	● 長期間の建設期間の空白により、原子力の軽水炉の大型主要資機材の製造能力を喪失  ● 燃料開発、高速炉含む小型炉の開発・建設に注力 ● 革新軽水炉や小型炉を中心に第3国展開も計画 ● 鍛造品等国内製造できないものは海外調達の方針	● 先進原子炉実証プログラム(ARDP) 32億\$ / 6年 SMRやその他先進炉実証に向けた技術開発や概念設計を支援 ● 民間原子力クレジット(CNC)プログラム 60億\$ / 5年 国内製造燃料の自給率の高い原子炉を優先支援 ● 米国原子力エネルギーサプライチェーン戦略 ATF（事故耐性燃料）やHALEU(U235濃縮度5～20%の低濃縮ウラン)、TRISO（高温ガス炉燃料）に係るR&Dへの財政支援を表明
英国	● 自国サプライチェーンは弱体化。大型軽水炉は仏国から技術導入。 ● 革新炉における自国製造比率を2割以下と評価  ● 高温ガス炉・軽水炉SMRの国産化率上昇にポテンシャルを見だし、研究開発へ投資。 ● 大型軽水炉の国内建設を通じ、自国産比率向上を狙う。	● 先進原子炉基金 最大3.85億£ 次世代原子炉（原子炉潜水艦やガス炉等の経験を踏まえ、SMR、高温ガス炉を選定）の設計・開発を支援 ● 未来の原子力実現基金 1.2億£ 国内の大型軽水炉新設PJに貢献する自国サプライチェーンの製造能力増強等に助成金を交付予定

⑤ – 1. 各国のサプライチェーン戦略と支援策について②

- 仏韓は自国での建設経験や海外輸出を通じ、国内でほぼ全ての資機材の製造が可能な強固なサプライチェーンを構築。既存のサプライチェーンを活かし、革新軽水炉に注力する方針。
- 仏国は現場の技能人材の維持・強化、韓国は官民連携による輸出の支援など革新軽水炉の製造基盤の強化に対しても支援を実施。

国名	各国サプライチェーン戦略	支援策
仏国	● 欧州内新設PJを通じ、大型軽水炉サプライチェーン立て直し。  ● 革新軽水炉の国内新設、さらには東欧への進出も狙い、製造業や現場の技能人材等の強化に大規模支援	● Excell Plan 1億€ フランス政府からの資本注入を受け、EDFは現場人材やプロジェクトマネジメントの強化に投資 ● フランス復興計画 4.9億€ 原子力産業のデジタル化や原子力技能人材の強化（1.5億€） 原子力関連中小企業を支援するファンド（フランス原子力基金）を設立（国1億€、EDF1億€） SMR・廃棄物管理可能な炉型の開発を支援
韓国	● 国内新設と海外PJを通じ、国内に強固なサプライチェーン  ● 国内新設の継続を基盤に、新興国への機器・プラント輸出に注力。革新炉はSMRに照準。	● SMR研究開発支援 4,000億ウォン ● 2022年度原発輸出インフラ建設事業 47.9億ウォン 輸出情報・支援ポータルサイト構築、トップ外交等を通じ、官民でサプライヤのビジネス創出をサポート

- ⑤- 1 海外の原子力サプライチェーンの現状と戦略
- ⑤- 2 国内の原子力サプライチェーンの分析**
- ⑤- 3 国内原子力産業による海外市場への参画ポテンシャル

⑤－２．原子力産業は多くのサプライチェーンを国内に保持

- 原子力の技術は、技術導入の当初は海外からの輸入割合が高かったものの、**1970年以降に営業運転を開始した原発の多くで国産化率90%を超え、国内企業に技術が集積されている分野。**
- **原子力産業は、サプライチェーン（約1,000万個の部品点数）を国内に持ち、国内の発電所の安定利用や経済・雇用等に貢献してきた。**

原子力発電所の国産化率の推移

発電所	東海 (黒鉛炉)	美浜1号 (PWR)	高浜2号 (PWR)	玄海2号 (PWR)	柏崎刈羽5 (BWR)	柏崎刈羽7 (ABWR)
運転開始年	1966	1970	1975	1981	1990	1997
国産化率 (%)	35%	58%	90%	99%	99%	89%

原子力産業のサプライチェーンを国内に保持する意義

①原子力発電所の安定的な利用

- 部品の調達先へのアクセスが確保されることで、迅速かつ高品質なメンテナンスが継続的に受けられる。
- 為替や国際情勢による影響を受けずに、安定した価格と納期で機器・部品等の調達を行える。

②国内経済・雇用への裨益

- 原子力産業は年間2兆円の収益と5万人規模の雇用効果をもたらす。
- 発電所立地により、地域経済に貢献。

③生産設備・製造技術の蓄積による産業の発展

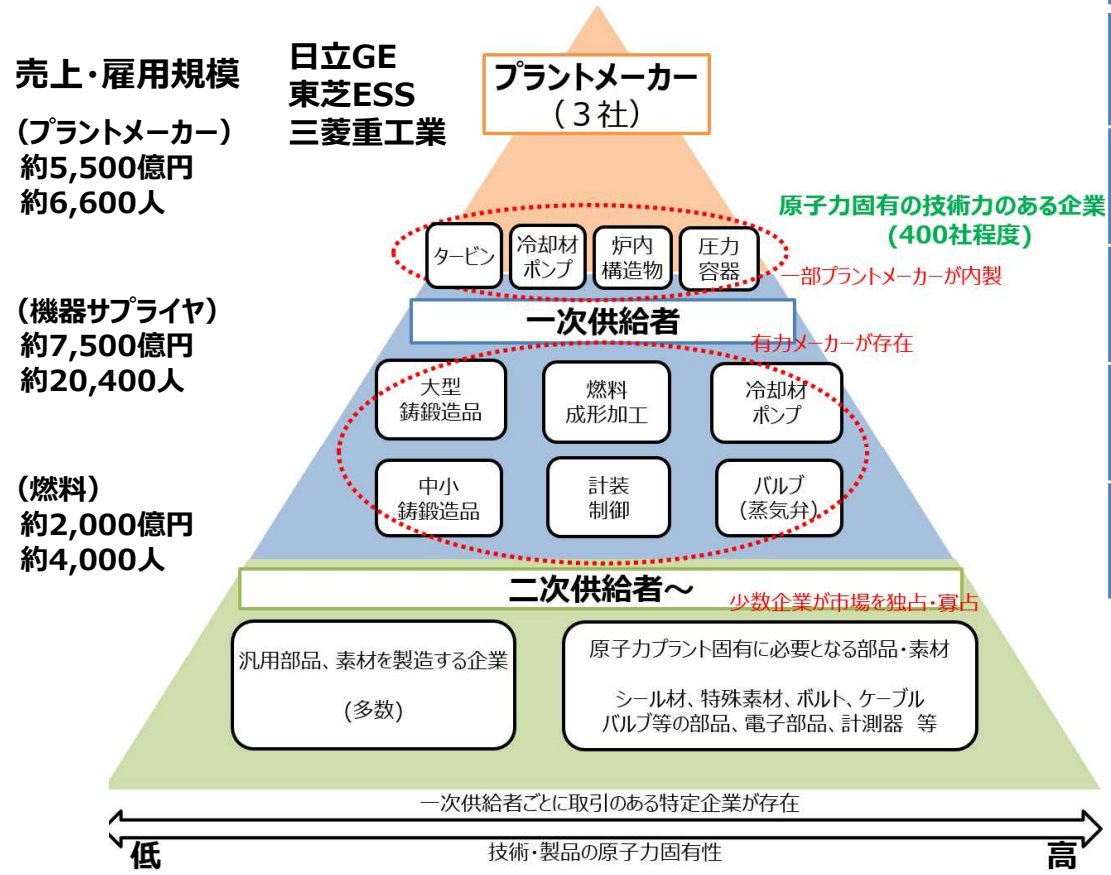
- 原子力機器・部素材の製造ラインや技能はクレーンやシールドマシンといった大型機器や、火力等汽水発電のタービン等と共通。
- 原子力機器生産に必要な厳格な検査のノウハウが半導体等の精密機器事業に活用される例も。

④放射線管理技術の維持・向上

【参考】原子力サプライチェーンの現状

- 日本の原子力産業は、原子力エンジニアリングを担うプラントメーカーに加え、燃料や圧力容器、タービンといった主要機器、それらの部素材に至るまで国内に高品質なものづくりの基盤を構築。

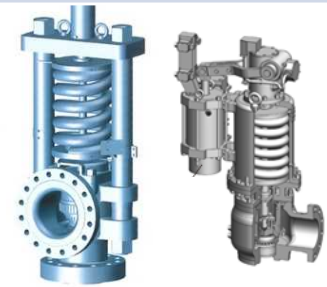
原子力のプラント・機器製造等のサプライチェーン



	製品例（主要サプライヤ例）
原子炉容器	原子炉容器（三菱重工業、IHI） 大型部材（日本製鋼所M&E）
タービン	蒸気タービン（三菱重工業、東芝ESS） 大型部材（日本製鋼所M&E）
ポンプ	一次系（三菱重工業、日立GE、東芝ESS、荏原製作所） 二次系・安全系（荏原製作所、関水社）
バルブ	大型バルブ（BWR：岡野バルブ、PWR：TVE） 中小型バルブ（平田バルブ）
炉内構造物	制御棒駆動装置（三菱重工業、日立GE、東芝ESS） 部素材（日立金属、大同特殊鋼、助川電気工業）



原子炉圧力容器部材
(日本製鋼所M&E)



主蒸気安全弁
(TVE、岡野バルブ)



起動給水ポンプ
(荏原製作所)

【参考】主要国の原子力サプライヤ

● 日本は主要国の中で、仏韓に匹敵する広い範囲で強固なサプライチェーンを温存。

構成機器	米国	英国	仏国	韓国	日本
エンジニアリング	Shaw Group Bechtel	NNB GenCo (EDFエナジーの子会社)	EDF	KEPCO E&C	三菱重工業 日立GE 東芝ESS
燃料	Westinghouse GE	Springfields Fuels	Framatome	Korea Nuclear Fuel Company	三菱原子燃料 GNFJ 原子燃料工業
濃縮	Lousiana Energy Services LLC	URENCO UK	Orano		日本原燃
炉内構造物	Westinghouse		Framatome (旧Valinox) Eiffage	Doosan	三菱重工業 日立GE 東芝ESS
原子炉容器			Framatome	Doosan	三菱重工業 IHI
鍛造品	North American Forgemasters (※)	Sheffield Forgemasters (※)	クルゾ・フォルジュ	Doosan	日本製鋼所M&E
格納容器 ・建屋	Bechtel Newport News Industrial	Bylor	Bouygues	GS E&C、SAMSUNG、 HYUNDAI E&C、DAEWOO E&C、SK E&C、DAELIM E&C	三菱重工業 IHI
ポンプ	Curtiss-Wright Hayward Tyler Gardner Davis Nash Flowserve SPX FLOW	Selwood	Framatome アルストム・パワーシステムズ	Doosan CW-Hydro HYOSUNG GOODSPRINGS	三菱重工業 日立GE 東芝ESS 荏原製作所 関水社
バルブ	Georgia Transformer Enertech Crane Nuclear Chromalox Inc.	IMI Critical Engineering	アルストム・パワーシステムズ Daher Valco (旧Guichon Valves) Velan	Doosan PK Valve Samshin	TVE 岡野バルブ 平田バルブ
蒸気発生器			Framatome Valinox Nucleaire	Doosan	三菱重工業
蒸気タービン			アルストム・パワーシステムズ	Doosan	三菱重工業 東芝ESS

【参考】原子力産業サプライチェーンの強み

製品名	社名	技術的強み・実績
原子炉容器 /格納容器	三菱重工業	国内PWRプラントに納入。 <u>海外では上蓋含め、米国、欧州、中国等に計26基納入。</u>
	IHI	国内BWRプラント(東芝ESS)に納入。 <u>海外では米国、台湾、中国等に計15基納入。</u>
蒸気発生器	三菱重工業	PWRの特有機器である蒸気発生器を製造。海外では <u>仏国、米国等に計31基納入。</u>
	日本製鉄	<u>世界でも数社しか製造できない、蒸気発生器用伝熱管を国内で唯一製造。</u>
タービン	三菱重工業	国内PWRプラントに納入。 <u>海外では中国、メキシコ、台湾等に計13基納入。</u>
	東芝ESS	国内BWRプラント(東芝ESS)に納入。 <u>海外では米国、UAEに計6基納入。</u>
大型鍛造品	日本製鋼所M&E	<u>大型鍛造品部材を製造できる世界でも有数のメーカー。</u>
ポンプ	三菱重工業	一次冷却材ポンプ等を製造し国内PWRプラントに納入。 <u>英国に納入予定あり。</u>
	東芝ESS	一次冷却材ポンプ（インターナルポンプ）を製造し国内BWRプラントに納入。 <u>台湾に納入実績あり。</u>
	荏原製作所	国内BWRプラントの主要サプライヤ。 <u>PLRポンプ(原子炉冷却材再循環ポンプ)を国内で唯一製造。</u>
	関水社	PWR、BWRの廃棄物処理系ポンプを製造。 <u>もんじゅ、HTTRについても納入実績あり。</u>
	助川電気工業	原子力計装機器を製造。ナトリウムの扱いノウハウを保有しており、 <u>もんじゅにナトリウムポンプを納入した実績あり。</u>
バルブ	TVE	重要度の高いクラス 1 のバルブを国内PWRプラント向けに製造。
	岡野バルブ	重要度の高いクラス 1 のバルブを国内BWRプラント向けに製造。 <u>BWRX300のバルブ開発にも注力。</u>
炉内構造物 素材	日立金属	特殊なステレンス鋼が使われる制御棒駆動装置等の部素材を製造。 <u>国内プラントの大半は当社が納入。</u>
	大同特殊鋼	中小型特殊鋼等の炉内構造物の部素材をプラントメーカーに納入。 <u>米国や中国等に海外実績もあり。</u>
	東洋炭素	高温ガス炉の炉内構造物に使用される黒鉛材を製造。 <u>国内ではHTTRの他、中国にも納入実績あり。</u>
燃料	原子燃料工業	国内で唯一PWR、BWR両方の燃料を製造。また、 <u>国内で唯一高温ガス炉燃料製造実績あり。</u>

【参考】原子力機器の国産化率向上の歴史

- 1960年代、エネルギー安全保障や最先端技術育成の観点から、政府支援の下、海外企業に頼らない技術開発・建設が進められ、電力会社・機器メーカーによる原子力機器の国産化が進んだ。
- 原子力機器産業は高付加価値産業であり、他産業への波及効果も大きいとして、1970年代後半以降、改良標準化や新炉型開発等を支援。

1960年代（初期原子力発電所建設時）
～国産化の推進～※1

1966年海外企業が主契約となり、敦賀発電所、福島第一原子力発電所、美浜第一発電所の建設計画が確定。※2

1966年日本開発銀行が「原子力発電機器国産化」融資制度を創設。※3

1967年島根原子力発電所建設計画において、日立が国内事業者として初めて単独で主契約。

1974年島根原子力発電所が運転開始。

※1:密接な共同研究を通じ、多くの国産技術（格納容器、圧力容器、炉内構造物、炉内機器等）を取り入れた。

※2:敦賀・福島第一はGE、美浜はWH。国内プラントメーカーが下請けとして技術を吸収しながらノウハウの吸収や人材育成を進めた。

※3:電力会社が原子力機器を購入する際に行う資金調達について、低金利・長期間の融資を可能にする制度。

発電所 （運転開始年）	敦賀1号機 （1970）	島根1号機 （1974）	美浜3号機 （1976）	浜岡2号機 （1978）	玄海2号機 （1981）	福島第二1号機 （1982）
国産化率	55%	94%	93%	94%	99%	98%

1970～1980年代
～改良標準化の推進※4～

1975～77年第一次改良標準化

1978～80年第二次改良標準化
（主な成果）
- 制御棒駆動機構の自動化
- 蒸気発生器検査の自動化
- 格納容器の大型化（保守点検スペースの拡大）等

1981～85年第三次改良標準化
「機器、システムだけでなく、原子炉本体を含む自主技術を基本とした日本型軽水炉の確立を図る」として、軽水炉開発を支援。
（支援対象）
- 東芝、日立、GEによる改良型A-BWR
- 三菱重工、WHによる改良型A-PWR

※4:改良標準化の主な目標は、プラント稼働率の向上と被曝低減の2つとされた。また、1980年頃に日本型標準化プラントの仕様を策定することが目標とされた。

⑤－ 2． 原子力産業における国内事業環境の変化

- サプライヤは、現在は安全対策工事で事業を維持しているが、将来の事業見通しが立たない状況。
- 要素技術を持つ中核サプライヤー等の撤退が相次いでおり、サプライチェーンの一部に脆弱性。
- 国内で建設や製造の現場の空白期間が続くことによる技術・人材の維持は喫緊の課題。

原子力事業からの撤退

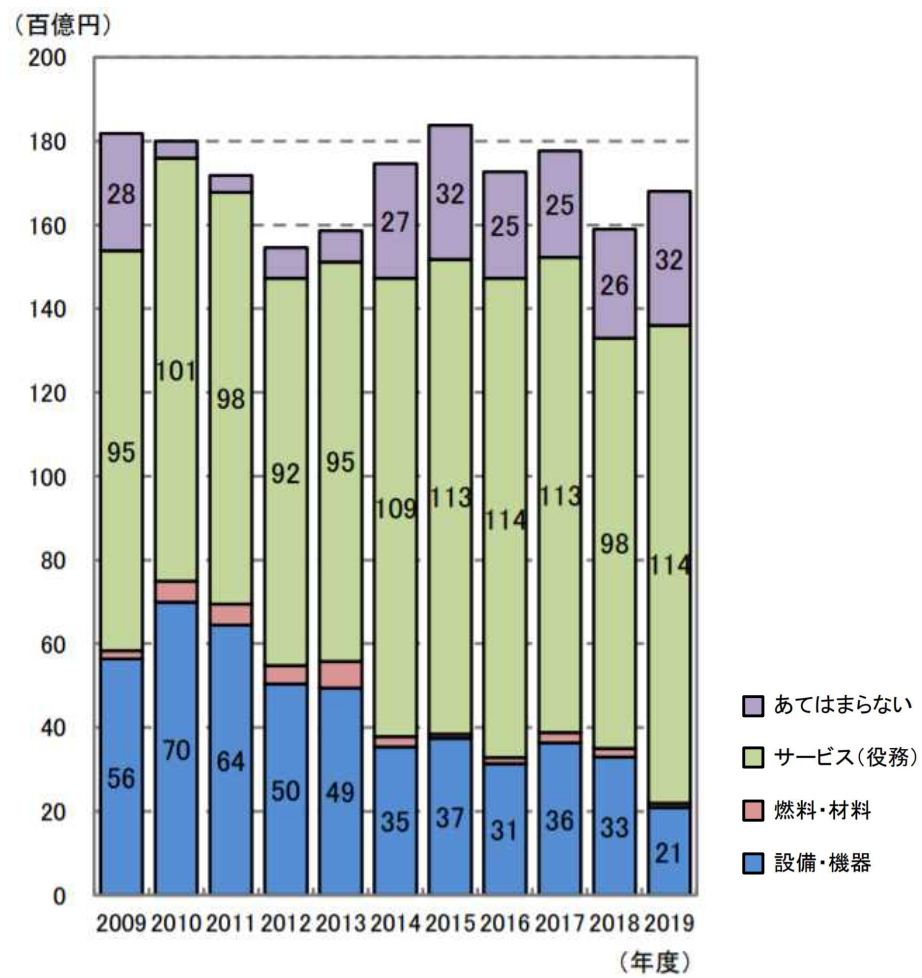
<大手企業>

- ・ 川崎重工業（廃止措置、発電所の保守管理等）
- ・ 住友電気工業、古河電気工業（燃料製造加工）
- ・ 明電舎（DCモータ）

<要素技術を持つ中核サプライヤ>

- ・ ジルコプロダクツ（燃料部材）
2017年廃業
⇒ BWR用燃料被覆管部材は国内で調達できない状況に
- ・ 日本鋳鍛鋼（圧力容器、タービン等部材）
2020年廃業
⇒ 原子炉圧力容器部材の供給企業は国内残り1社に

原子力産業界の売り上げの推移



⑤－２．高速炉、高温ガス炉におけるサプライチェーンの状況

- 常陽・もんじゅ、HTTR建設を通じ、国内に高速炉・高温ガス炉のサプライチェーンを構築してきた。
一方、その後20年以上実機プロジェクトが途絶、過去に構築したサプライチェーンの一部に脆弱性。
- 今後の炉型開発の見通しが立たない中で、サプライヤは、技術・人材の維持やサプライチェーンの再構築のための投資ができない状況。

常陽・もんじゅ・HTTRの建設により国内サプライチェーンの構築に成功



★常陽

概念設計開始：1965年
建設開始：1971年
運転開始：1977年



★もんじゅ

予備設計開始：1968年
建設開始：1983年
運転開始：1995年
(発電)



★HTTR

概念設計開始：1969年
建設開始：1991年
運転開始：1998年



20年以上の建設期間の空白

サプライチェーンが一部欠け、技術・人材の継承も事業環境の見通しが立たず困難

高速炉サプライチェーン

- ✓ 一部の製鋼品、炉心の構成素材については新規の調達先の開拓が必要なものの、調達不可能な部素材は少ない。
- ✓ 高速炉特有のナトリウム関連機器(バルブ・ポンプ等)については、製造機会が少なく技術の伝承に苦戦。

高温ガス炉サプライチェーン

- ✓ 多くの部素材については軽水炉と共通しているものも多く、技術の維持は現状図れている。
- ✓ 燃料についてはHTTRの蓄積があるが、軽水炉燃料ビジネス環境の悪化に加え、製造機会がなく技術伝承が困難。
- ✓ タービン・蒸気発生器についてはHTTRでの蓄積が無く、ヘリウムに対応させるための技術開発が必要。

⑤－２．革新炉型毎の日本原子力産業のサプライチェーンの現状

- 革新軽水炉や小型軽水モジュール炉のサプライチェーン（SC）は、大型軽水炉の既存SCと共通しており、特に革新軽水炉のサプライヤは、海外への市場展開にも期待。
- 高温ガス炉のSCについて、一部の要素技術が不足するも、グローバルでも固有の強みを持つサプライヤも存在。高速炉のSCは、もんじゅ等のプロジェクトにおける製造実績に強み。

炉型	エンジニアリング	原子炉容器	蒸気発生器	大型鍛造品	炉内構造物	バルブ	ポンプ・循環機	タービン・発電機	燃料	サプライチェーンの特徴/現状
革新軽水炉	●	◎	◎	◎	○	○	○	◎	●	✓ 大型軽水炉の既存SCと共通 ✓ 海外実績を有するサプライヤも存在
小型軽水炉	●	○	○	○	○	○	●	◎	●	✓ 大型軽水炉の既存SCと共通 ✓ 海外PJは自国産比率を重視
高温ガス炉	○	○	○	◎	◎	△	△	◎（蒸気） △（Heガス）	△	✓ 高温気体への対応等は、既存SCでは不十分 ✓ 炉内構造物や燃料に固有の強みをもつサプライヤが存在、燃料は技術伝承が課題
高速炉	●	○	○	◎	○	△	○（機械式） △（電磁式）	◎	△	✓ もんじゅ等の製造実績は海外展開に向け強み ✓ もんじゅ以降製造機会がなく、Na、炉心周り等の固有技術の承継に課題

◎：国内に供給サプライヤあり、海外市場でも一定の競争力

○：国内に供給サプライヤあり、海外市場展開のポテンシャルあり

●：国内に供給サプライヤあり、海外市場では、炉型のエンジニアリングメーカーや現地サプライヤによる供給が一般的

△：国内の既存サプライチェーンの一部に課題あり

- ⑤- 1 海外の原子力サプライチェーンの現状と戦略
- ⑤- 2 国内の原子力サプライチェーンの分析
- ⑤- 3 国内原子力産業による海外市場への参画ポテンシャル**

⑤－３．革新炉のR&Dと連携したサプライチェーン戦略の策定

- 米英仏では、エネルギー政策上の原子力の価値に加え、自国のサプライチェーンや技術の現状を踏まえ、産業政策の観点から新設炉型を決定し、R&Dやサプライチェーン支援に大規模な資金を投入。
- 日本でも、産業政策の視点から、R&Dと一体的なサプライチェーン戦略を策定していくことが必要。

産業政策の視点（例）

（１）原子力産業の成長（直接的な経済効果）

- ✓ 海外で機会の増加が見込める革新炉の将来市場の獲得（貿易収支の増加）

（２）地域経済・雇用への波及（間接的な経済効果）

- ✓ 原子力産業による国内経済への波及は年間2.1兆円、4.9万人の雇用に貢献

（３）経済安全保障

- ✓ 他国の情勢にとらわれず、原子力発電所の安定的な利用が可能に

⑤ – 3. 革新炉型毎のグローバル市場獲得ポテンシャル

- 革新軽水炉は海外市場で一定の競争力を有するサプライヤも存在。
- その他炉型についても、相手国のサプライチェーンの弱みを補完する形で初号機プロジェクトに参画し、実績を積むことで、将来市場を獲得できる可能性。

炉型	対象国	市場規模※	機器・部材例	備考
EPR	英、仏、東欧 (18基～)	250億～/基	大型鍛造品、ポンプ 蒸気発生器等 伝熱管、バルブ 等	仏英において、大型の革新軽水炉（EPR、EPR2）の建設の動き。 <u>日本勢による受注確度が高い機器・部材もあり</u> 、仏国内の生産能力次第では <u>更なる市場拡大が見込める可能性。</u>
AP1000	欧州 (数基～)	250億～/基	タービン、格納容器 大型鍛造品、ポンプ、バルブ 等	WECはAP1000について、グローバルで受注を目指す。 <u>米ボーグルでは日本企業の実績あり、第三国展開においても市場獲得の可能性。</u>
高温ガス炉	英、ポーランド (各1基)	400億～/基	制御棒駆動装置、炉内構造物 燃料交換機、大型鍛造品 バルブ等	英国実証炉やポーランド研究炉について、HTTRで実績をもつJAEAと連携できる可能性。 <u>自国調達目標が低く（英国は自国調達率50%を目標）、主要な構成機器・部材について、受注の可能性。</u>
高速炉 Natrium	米 (1基)	200億～/基	燃料交換機、制御棒計装 原子炉容器、バルブ等	<u>JAEAのもんじゅの経験を活かし、米国テラパワー社と開発協力。原子炉容器、炉内構造物、Na冷却系統機器は、受注の可能性。</u> 一方、 <u>Buy American条項（自国調達率75%以上）に留意。</u>
BWRX-300	カナダ、米等 (7基～)	60億～/基	原子炉容器部材 制御棒駆動機構 バルブ、炉内構造物等	日立GEやIHIは資本提携した上で、機器・部材への参画を検討中。 <u>米加ともに自国の産業振興の観点で自国調達率を重視。</u>
VOYGR (NuScale)	米、ルーマニア等 (1基～)	100億～/基	格納容器、伝熱管、溶接材 等	

⑤－３．革新軽水炉におけるグローバル市場獲得戦略

- 各国がEPR、AP1000といった革新軽水炉の建設を表明。市場のポテンシャルも高く、仏国が強固なサプライチェーンを構築する中でも、今後の欧州大陸での建設需要は供給能力を上回る可能性。
- 特に、自国の産業基盤が仏ほど強固ではない英国・東欧において、日本サプライヤに参入ポテンシャル。
- EPRにおいてはベンダーであるフラマトムへの出資比率約20%のMHIに、AP1000については東芝ESS・IHIを筆頭に関連サプライヤとともに参画できるポテンシャルあり。

市場見込

- ✓ EPR、AP1000併せて最大32基の新設の原子力発電所の建設可能性あり。市場のポテンシャルは8,000億円以上という見方も。
 - 仏国（EPR）
マクロン大統領が最大14基の国内新設行うことを表明。
 - 英国（EPR）
2030年までに新設8基の建設承認を終了させると表明。
 - ポーランド（EPR、AP1000）
大型軽水炉を2043年までに6基導入する方針を発表。
 - チェコ（EPR、AP1000）
2基の原子力発電所のサプライヤ競争入札を開始。
 - オランダ（EPR、AP1000）
新たに2か所で原子力発電所の建設方針を明記。

各国サプライチェーン分析

- ✓ 仏国のサプライチェーンの自給率ほぼ100%。他方、国内での最大14基建設に加え、欧州での建設需要が高まれば、仏国内の生産能力が不足する可能性。
- ✓ 英国・ポーランド・チェコのサプライチェーンは未成熟であり、建設において、他国サプライヤに機会。

革新軽水炉における日本の実績

- ✓ EPRにおいては、三菱重工業が原子炉容器やポンプを、日本製鋼所M&Eが大型鍛造品を納入。
- ✓ AP1000については東芝ESS・IHI（タービン・格納容器）を筆頭に東亜バルブ（バルブ）、荏原製作所（ポンプ）、大同特殊鋼（炉内構造物素材）が納入実績を保有。

【参考】欧米諸国の大型軽水炉新設におけるサプライチェーン

- AP1000については、米国ボーグル3号機の建設において、東芝ESS・IHIが蒸気タービンや格納容器の実績。EPRは仏国内建設への参入余地は不透明であるものの、仏国外の建設においてはポンプ、大型鍛造品等において、三菱重工業、JSW等実績あるプレーヤーも。

	AP1000	EPR	
構成機器	米国AP1000	英国ヒンクリーポイントC	仏国フラマンビル
原子炉容器	Doosan【韓】	Framatome【仏】 クルゾ・フォルジュ（鍛造品）【仏】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）	Framatome【仏】 クルゾ・フォルジュ（鍛造品）【仏】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
格納容器・建屋	Bechtel【米】、Newport News Industrial【米】、 IHI【日】	Bylor【英】	Bouygues【仏】
ポンプ	Curtiss-Wright（1次系）【米】 Hayward Tyler （蒸気発生器再循環ポンプ）【米】 Gardner Davis Nash （真空ポンプ）【米】 Flowserve【米】	Selwood【英】 SPX FLOW【米】 三菱重工【日】	Framatome（1次系）【仏】 アルストム・パワーシステムズ
バルブ	Georgia Transformer【米】 Enertech【米】 Crane Nuclear【米】 Chromalox Inc.【米】	Velan【加】 KSB【独】	アルストム・パワーシステムズ
蒸気発生器	Doosan【韓】	Framatome【仏】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）	Valinox Nucleaire【仏】 日本製鋼所M&E【日】（鍛造品）
蒸気タービン	東芝ESS【日】	アルストム・パワーシステムズ	アルストム・パワーシステムズ

⑤－3．高速炉・高温ガス炉におけるグローバル市場獲得戦略

- 高速炉・高温ガス炉において米国、英国、ポーランドはサプライチェーンが確立されておらず、もんじゅ・HTTRの建設経験を持つ日本と協力を志向。
- 初号機開発に食い込むことは今後の海外市場の獲得のためには非常に重要。
- 世界で日本にしかない技術・ノウハウを武器に、建設プロジェクトへの参画、標準獲得等のポテンシャル。

市場見込

- ✓ 米英は2030年代頃の実証炉運転、ポーランドは実験炉の建設を視野に、予算支援や国際協力を推進中。
 - 米国（ナトリウム高速炉）
TerraPowerは2028年の実証炉運転開始を目指す。
 - 英国（高温ガス炉）
国際連携を通じ、2030年代初頭の実証炉建設を目指す。
 - ポーランド（高温ガス炉）
時期は未定ながら、実験炉の建設を目指し予算措置を実施。



もんじゅ



HTTR

各国サプライチェーン分析

- ✓ 高速炉は、軽水炉に比べ高温に耐えうる素材、及び高温低圧ナトリウム環境に対応する設計が必要。
- ✓ 高温ガス炉は高速炉以上の超高温に耐えうる素材、ヘリウムに対応する設計が必要。
- ✓ 各国建設経験が少なく、サプライチェーンは未成熟。

高速炉・高温ガス炉における日本の実績

- ✓ 高速炉においては常陽・もんじゅの建設経験を、高温ガス炉においてはHTTRの建設経験を保有。
- ✓ 高速炉・高温ガス炉において、国内でのサプライチェーンを過去に確立しており、各サプライヤーはそれぞれ製造を担当した機器のノウハウの蓄積あり。

⑤－３． 小型軽水モジュール炉におけるグローバル市場獲得戦略

- 米国、カナダは自国のサプライチェーンの国産率の上昇を志向しているが、一部の主要機器については日本も参画の可能性。
- 既に米国、カナダ発で東欧へ展開する動きもあり、日立GEやIHIを筆頭に、これらに積極的に参画していくとともに、建設地点から近い距離で生産できるのは原子力機器の輸出においては大きなメリットになるため、今後、小型軽水モジュール炉のアジア展開の際には機器製造拠点となるポテンシャルも。

市場見込

- ✓ 米加を中心に、東欧でも小型軽水モジュール炉建設の動きが拡大。現在世界では少なくとも30基程度の建設計画が進んでいるもの。
 - 米国（VOYGR/BWRX300）
NuScaleは2029年に初号機の運転開始を予定している。
TVAがClinch River SiteにBWRX-300建設を検討中。
 - カナダ（BWRX-300）
OPG社は最速2028年の運転開始を目指す。
SaskPowerも2034年導入の検討を発表。
 - ルーマニア（VOYGR）
2021年にNuScale社製の小型軽水炉の建設計画を発表。
 - チェコ（未定）
小型軽水炉建設の敷地を確保を公表、現在炉型選択中。

各国サプライチェーン分析

- ✓ 米加共に自国の自給率について一定の水準目標を定めており、自国のサプライチェーンを確立していく動き。
- ✓ ルーマニア、チェコはサプライチェーンが未成熟であり、国際連携を通じてサプライチェーンを形成するという見方も。

小型軽水モジュール炉における日本の実績

- ✓ NuScale社に対し、日揮は40百万ドル、IHIは20百万ドル。JBICが110百万ドル出資を発表。
- ✓ GE日立と関係が深い日立GEは国内の設備を使い、BWRX-300の要素技術の実証に向けた研究開発を実施中。

【参考】有志国での共同サプライチェーン構築への期待

- 革新原子炉及び小型モジュール炉（SMR）の開発及び世界展開の加速にコミットし、強靱な原子力サプライチェーンを構築することで一致。

ファクトシートよりクリーンエネルギー分野を抜粋

- 日本クリーンエネルギーパートナーシップ（JUCEP）の下、小型モジュール炉（SMR）を含むクリーンエネルギーに関するキャパビル活動を実施
- エネルギー安全保障とネット・ゼロ・エミッションの双方を達成するための日米クリーンエネルギー・エネルギーセキュリティ・イニシアティブ（CEESI）を設立
- 原子炉の運転期間の長期化と燃料供給の安定性確保に関する協力を含め、既設炉の最大限の活用のための協力の機会を追求
- 小型モジュール炉（SMR）や高速炉を含む革新的な原子力技術で協力、強靱なサプライチェーン構築の協力
- 日本は米国が主導するファースト・ムーバーズ・コアリション（First Movers Coalition※）に参画

※2050ネット・ゼロを達成するために必要な重要技術の早期市場創出に向け世界の主要グローバル企業が購入をコミットするためのプラットフォーム。
日本は「戦略パートナー国」として参画



【参考】地域経済・雇用への波及（間接的な経済効果）

- 原子力産業による経済・雇用への波及効果について、各国試算によると、年間一定の経済効果や雇用を促す効果があるとしている。

	年間当たりの 経済効果 (円換算※)	雇用数	推定年度 (年)	原子炉（基）				サイクル関連施設 (稼働中のみ)		
				運転	廃止措置	建設	合計	商用 再処理	濃縮	燃料加工 (U集合体)
米国 	400億ドル (5兆2,000億円)	7万人	2012	93	40	2	135	—	1	2
英国 	64億ポンド (1兆500億円)	6.6万人	2016	11	34	2	47	1	1	2
仏国 	490億ユーロ (6兆7,000億円)	18万人	2019	56	15	1	72	1 (2系統)	1	1
韓国 	20兆7,300億ウォン (2兆1,100億円)	3.5万人	2019	24	2	4	30	—	—	2
カナダ 	60億加ドル (6,000億円)	3万人	2017	19	6	0	25	—	—	3
日本 	2兆1,000億円	4.9万人	2020	33	27	2	62	1 (建設中)	1	3

※：1米ドル：130円、1ポンド：164円、1ユーロ：137円、1ウォン：0.102円、1加ドル：101円換算

※各国で試算された原子力産業による年間あたりの経済効果（米国・仏国・韓国・日本は売上高総計、英国・カナダは粗付加価値）。

出典：原子炉・サイクル関連施設の情報はいAEA資料を基に作成、経済効果・雇用数は各国公表情報を基に作成

【参考】原子力産業は多くのサプライチェーンを国内に保持（再掲）

- 原子力の技術は、技術導入の当初は海外からの輸入割合が高かったものの、**1970年以降に営業運転を開始した原発の多くで国産化率90%を超え、国内企業に技術が集積されている分野。**
- **原子力産業は、サプライチェーン（約1,000万個の部品点数）を国内に持ち、国内の発電所の安定利用や経済・雇用等に貢献してきた。**

原子力発電所の国産化率の推移

発電所	東海 (黒鉛炉)	美浜1号 (PWR)	高浜2号 (PWR)	玄海2号 (PWR)	柏崎刈羽5 (BWR)	柏崎刈羽7 (ABWR)
運転開始年	1966	1970	1975	1981	1990	1997
国産化率 (%)	35%	58%	90%	99%	99%	89%

原子力産業のサプライチェーンを国内に保持する意義

①原子力発電所の安定的な利用

- 部品の調達先へのアクセスが確保されることで、迅速かつ高品質なメンテナンスが継続的に受けられる。
- 為替や国際情勢による影響を受けずに、安定した価格と納期で機器・部品等の調達を行える。

②国内経済・雇用への裨益

- 原子力産業は年間2兆円の収益と5万人規模の雇用効果をもたらす。
- 発電所立地により、地域経済に貢献。

③生産設備・製造技術の蓄積による産業の発展

- 原子力機器・部素材の製造ラインや技能はクレーンやシールドマシンといった大型機器や、火力等汽水発電のタービン等と共通。
- 原子力機器生産に必要な厳格な検査のノウハウが半導体等の精密機器事業に活用される例も。

④放射線管理技術の維持・向上

1. 革新炉開発の課題の整理

- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④革新炉開発の体制の整備
- ⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

2. 革新炉開発の課題への対応の方向性

課題	課題への対応の方向性(イメージ)
①革新炉開発の方向性の明瞭化	●基本方針の明確化、開発のポートフォリオとロードマップの策定 「CN達成・経済安保への貢献等といった社会的価値の実現」を、原子力を開発・利用していく上での中長期的な根拠・目標として明確化 - 自国の強み・サプライチェーンを軸に、2050年に向けた原子力開発の技術ポートフォリオを明確化し、技術ごとの導入の時間軸のイメージを提示 - それぞれの技術・炉型について、可能な範囲で具体的な開発工程のマイルストーンを示した技術ロードマップを策定し、継続的にメンテ・改訂
②予算(開発、施設整備)の整備	●プロジェクトベース／インフラベースでの研究開発支援の強化 - ロードマップに沿った実証プロジェクトを具体化し、課題検討のプロセスを通じて、将来を見越した民間企業能力涵養を推進 - 枢要技術への必要な資金の充当という観点に加えて、SPC・ベンチャー等の活用等による官民連携も念頭に、柔軟な支援手法のあり方を検討 - 幅広い分野に裨益する原子力人材・技術の育成にも貢献できる基盤インフラを明確化し、計画的に整備

③制度（規制、ファイナンス等）の整備

●導入に必要な事業環境の整備

- ・ 設置許可申請の事前段階を含めた規制当局との対話等を通じて共通理解を醸成し、予見性を確保しつつ、より安全な炉の開発を進めていくため、産業界が規制当局に、審査プロセスのあり方や技術的論点を能動的に提案。
- ・ 原子力電源の特性に鑑み、投資回収期間の長さ、費用回収のボラティリティ増大といった課題への制度的な対応策を検討。
- ・ バックエンドの諸課題について、国が前面に立って解決に取り組むことを明確化しつつ、具体的課題について政策対応の更なる踏み込み。

④革新炉開発の体制の整備

●開発プロジェクトマネジメントの強化

- ・ ステークホルダーとの調整、システム全体の一貫性担保を行う司令塔機能を創設。あわせて、システム設計を統括する中核企業を設定。
- ・ 民間のプロマネ人材の活用へチーム組成を進める。民間企業の参画を確保しつつ、基盤整備・基礎研究を行う国研等と効率的に役割分担。

⑤サプライチェーンの維持・強化

●サプライチェーン各工程に即した多様な支援メニューの整備・導入

- ・ 個別サプライヤー自らの販路開拓へ、政府による海外プロジェクトへの参画サポート（顧客確保・海外規格取得への支援、トップセールス等）
- ・ 材料の供給途絶リスクや事業承継問題への対応へ、産業大での実態把握・支援体制の構築、中小企業支援ツールの最大限の活用
- ・ 現場をはじめとした技術基盤維持へ、デジタル技術の活用支援や、業界横割りの人材育成システムの構築支援等

2-①. 基本方針の明確化、開発のポートフォリオとロードマップの策定

【中長期の政策方針に関する予見可能性の確保の必要性】

- 原子力はCN等の社会革新に貢献するポテンシャルを有する一方、開発・利用の正当性については様々な意見や懸念も存在。関係者の理解や予見可能性を確保する上でも、「開発・利用に当たっての意義・原則」を再確認・明確化すべきではないか。
- 原子力利用の範囲やあり方を制御しつつ、政策の一貫性・継続性を担保するためにも、「CN達成・経済安保への貢献等といった社会的価値の実現」を、原子力を開発・利用していく上での中長期的な根拠・目標として明確化すべきではないか。

【開発ポートフォリオの明確化／技術毎のロードマップの策定】

- その上で、産業界・大学・研究機関等の様々なステークホルダーの意思決定に資する、リソース配分の目安や開発の時間軸を共有することが必要ではないか。
- まず、自国の強み・サプライチェーンを軸に、2050年に向けた原子力開発の技術ポートフォリオを明確化し、技術ごとの導入の時間軸のイメージを示すべきではないか。
- さらに、それぞれの技術・炉型について、可能な範囲で具体的な開発工程のマイルストーンを示した技術ロードマップを策定し、継続的にメンテ・改訂していくべきではないか。

2-①. 2050年CNに向けた革新炉開発のポートフォリオ（ラフイメージ）

		技術 成熟度・ 時間軸	規制 対応	サプライ チェーン	市場性					非エネ分野
					経済性	水素製造	負荷追従	資源の 有効利用	廃棄物 有害度低減	
革新 軽水炉		◎ ※既存技術 を活用可	◎ ※既存規制 を活用可	◎ ※既存軽水 炉のサプライ チェーン有	◎ ※現行の軽 水炉と同水 準	△	○	△	△	○
小型 軽水炉	海外	○	○～◎	○～◎ ※日本が得 意とする大型 鍛造品が不 要のケースも	◎ ※米国のガ ス火力並が 目標	△	○ ※モジュールご との制御により 負荷追従可能 なものも	△	△	○
	国内	○	△ ※基準の議 論が必要	○～◎	?					
高速炉		○	○	◎ ※常陽、もん じゅの実績	◎ ※現行の軽 水炉と同水 準	○	◎ ※熔融塩の蓄 熱システムを組 み合わせた負 荷追従可能	◎	◎ ※Pu・MA燃焼可	◎ ※医療用PI製造 可
高温ガ ス炉		○	○	◎ ※HTTRの実 績	○⇒◎ ※コジェネ で経済性向 上	◎ ※高温を活用 した水素製造 可	◎	△	△ ※高燃焼度で処 分場面積低減 (○)	○ ※耐高温材料製 造技術の獲得
核融合 炉		× ※要素技術 の開発段階	△	○ ※ITERで 部分参加	?	◎	?	?	◎ ※高レベル放射 性廃棄物発生せ ず	○ ※コイルがヒッグ ス粒子発見に貢 献

【参考】技術成熟度（TRL）

- 特定の技術の成熟度の評価を行い、異なったタイプの技術の成熟度を比較することのできる定量尺度として、技術成熟度（TRL）が設けられている。

TRL（Technology Readiness Level）の定義

技術開発の 相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための 研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル

商用炉

実証炉

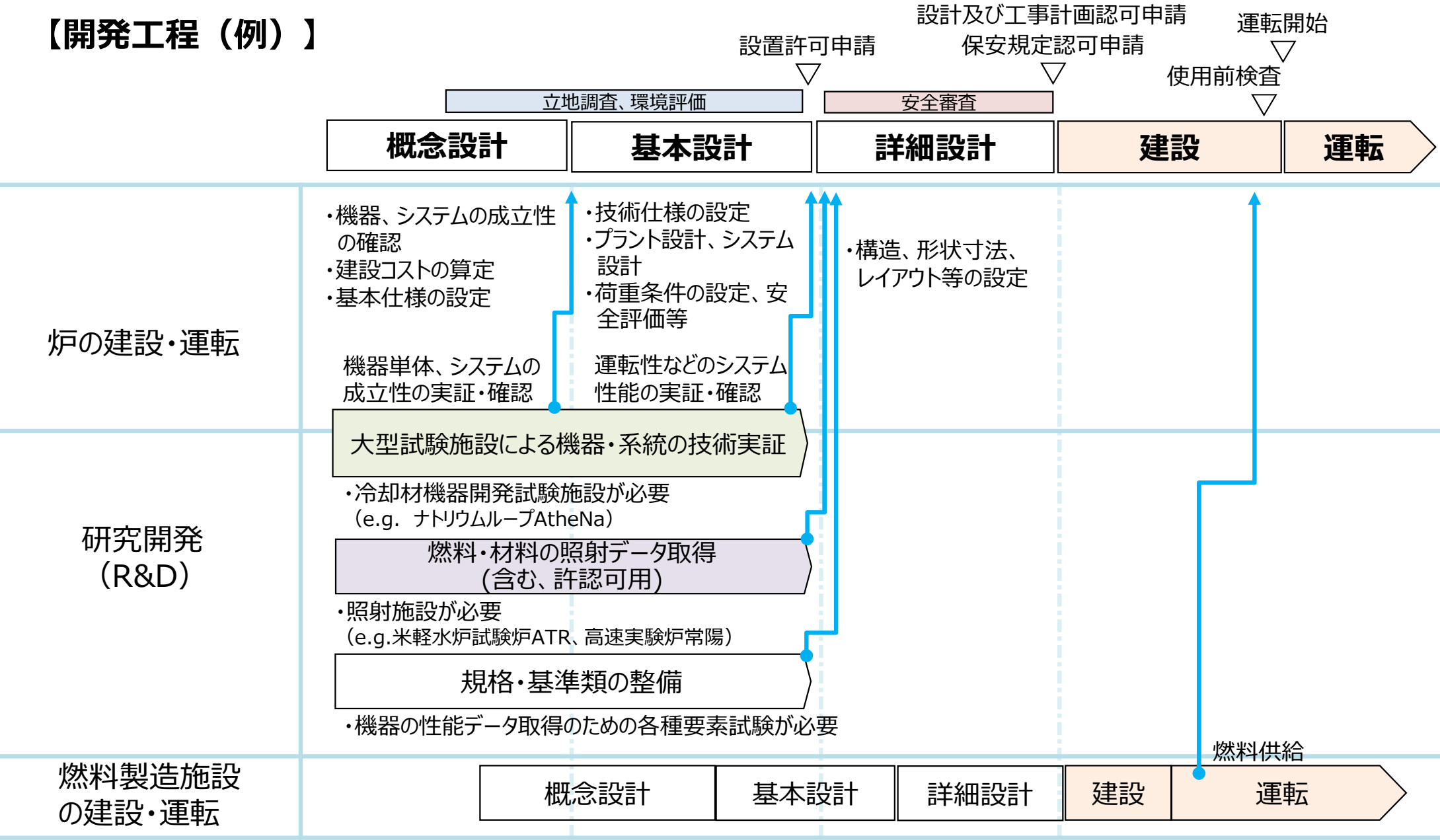
原型炉

実験炉

Technology Readiness Assessment Guide, U.S. DOE, DOE G 413.3-4A, 9-15-2011

2-①. 導入に向けた炉型毎の技術ロードマップ°（ラフイメージ）

【開発工程（例）】



2-②. プロジェクトベース／インフラベースでの研究開発支援の強化

- 革新炉導入へ、官民の実践的な能力涵養のため、以下の双方が必要ではないか。
 - ① 枢要となる技術に集中し、具体的なプロジェクトに即した研究開発を進めていくこと
 - ② 幅広い分野に裨益する、人材・技術育成の基盤インフラの整備等を進めていくこと

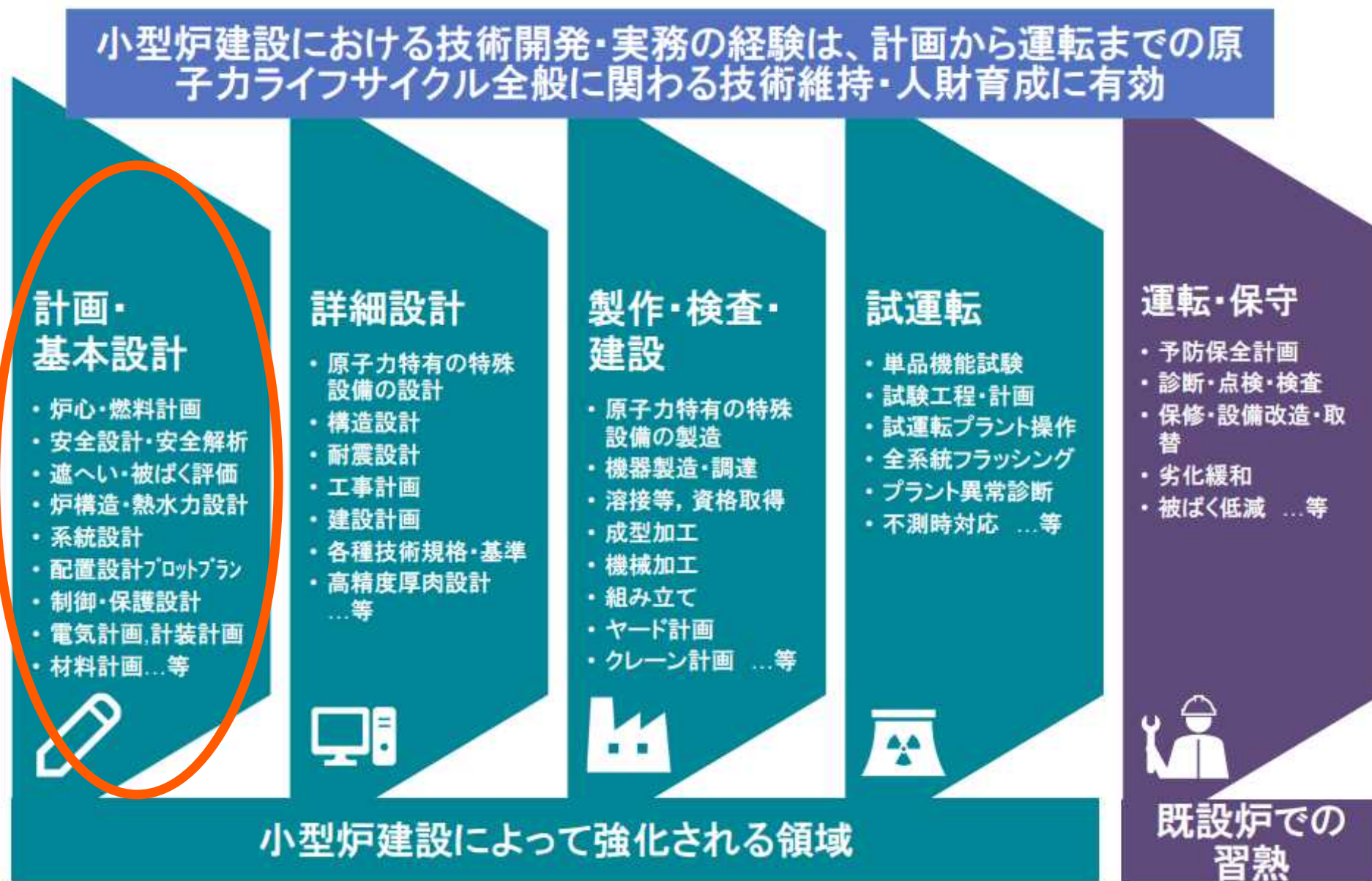
【プロジェクトベースでの研究開発支援の強化】

- 海外同様、ロードマップに沿った実証プロジェクトの具体化が必要。その際、導入以降まで見越したメーカーのシステムエンジ機能の強化等を念頭に、概念・基本設計等のプロセスで、具体的課題の検討を通じた蓄積を官民で効果的に進めるべきではないか。
- 支援に当たっては、枢要技術への必要な資金の充当という観点に加え、海外事例も参考に、SPC・ベンチャー等の活用による官民リソースの共用・育成も念頭に、柔軟な支援手法のあり方が可能となるよう、国の支援体制のあり方も検討すべきではないか。

【インフラベースでの研究開発支援の強化】

- 革新炉開発はもとより、既存炉に係る安全性の向上、発電以外の分野における原子力の成果活用等も含めて、幅広い分野に裨益する原子力人材・技術の育成に必要な基盤インフラを明確化した上で、計画的に整備していくことが必要ではないか。

2-②. プロジェクト創出によるシステムエンジニアリング機能の強化 (イメージ)



【参考】プラント建設経験者の減少

- 長期間、新規建設が無い状況により、各メーカーにおいてプラント建設経験者が減少。
- 国内の原子力産業基盤維持・強化のために、プラント開発を通じた人材育成が急務。

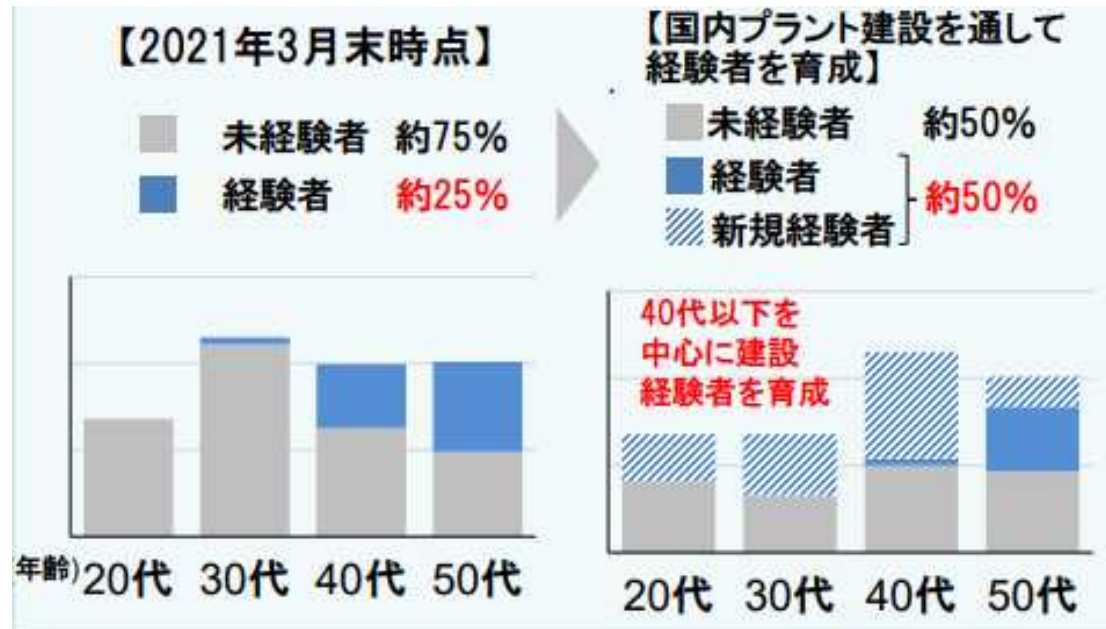


図. 日立製作所のプラント建設経験者年齢構成

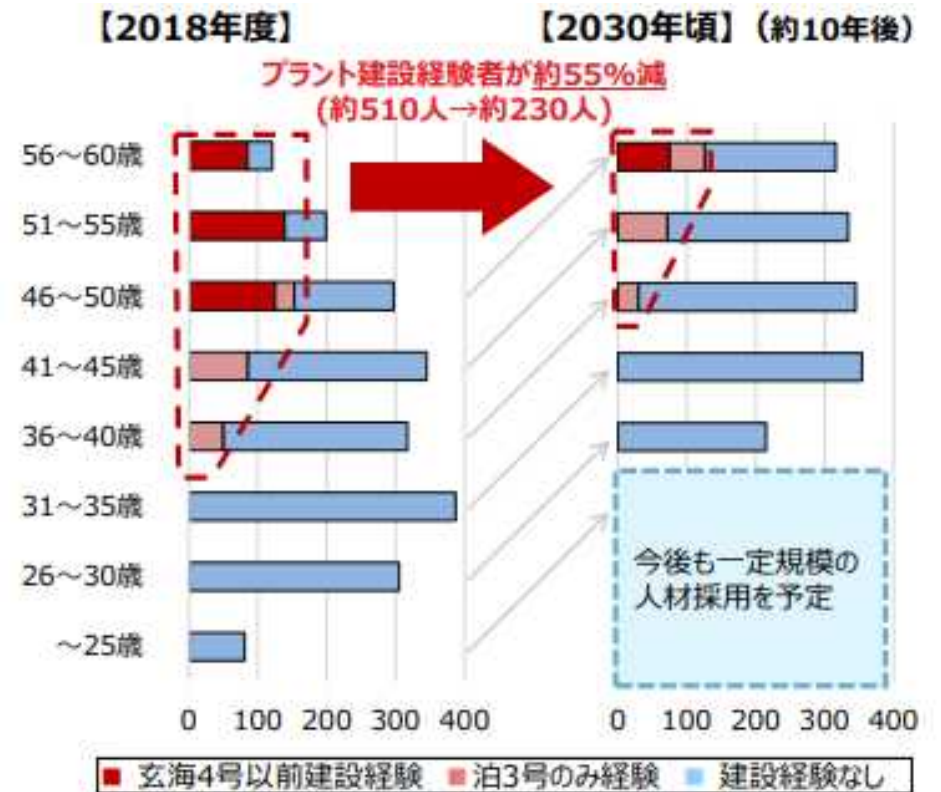


図. 三菱重工の原子力技術者人員構成の推移

2-③. 導入に必要な事業環境の整備

- 革新炉の導入に際しては、世界各国においても、新規制（既存炉との技術的な差異）に伴う安全審査の長期化、固定費の大きさや市場価格の変動等に伴う投資回収期間の長期化・変動といった課題に直面し、ビジネスとしての予見性低下が問題に。
- エネルギー密度が高い原子力が有する中期的な収支相償性・経済効率性を具現化するためには、こうした面をフォローするための制度面・政策面での対応も必要。
- また、個別の事業者では解決が難しいバックエンドの共通課題等の解決も必要となる。
- 海外の事例等も参考に、革新炉のポテンシャルを発揮するための制度・政策面でのサポートの検討や、事業者自らの新たな取組を進めていくべきではないか。

【円滑な導入に向けた安全規制当局との共通理解の醸成】

- 海外事例等を参考に、設置許可申請の事前段階を含めた規制当局との対話等を通じて共通理解を醸成し、予見性を確保しつつ、より安全な炉の開発を進めていくことが必要ではないか。
- そのため、産業界は、規制審査のプロセスや技術的な論点のあり方について、規制当局に双方向の対話を働きかけ、能動的・積極的な提案を行っていくべきではないか。

2-③. 導入に必要な事業環境の整備

【投資回収期間の長期化等への対応】

- CN実現に資する脱炭素電源の確保、化石資源に依存しない経済安全保障の確立、短期の需給調整にも資する低廉で安定したベースロード電源の確保という観点から、原子力電源の特性・意義を、同様の他電源とともに整理するべきではないか。
- その上で、投資回収期間の長さ、電力自由化に伴う費用回収のボラティリティ増大といった課題への制度的な対応策を検討すべきではないか。

【バックエンド問題への対応】

- 使用済燃料の再処理や高レベル放射性廃棄物の最終処分、通常炉の廃止措置や低レベル放射性廃棄物の処理処分等、一事業者が単独で対応するよりも国全体で対応すべきバックエンドの課題が、原子力事業全体の予見性を低下させており、革新炉の導入についてもハードルとなっているのではないか。
- こうした問題について、今後とも継続して、国が前面に立って解決に取り組んでいくことを明確化するとともに、廃止措置等の具体的な課題について、事業者の取組をサポートしていくためのさらなる踏み込みが必要ではないか。

2-③.【参考】原子力小委員会での意見（5月30日）

●産業界の規制当局との対話

- 原子力規制委員会の審査のスピードアップを求める報道もある中、ATENAやJANSIには、安全性に関する高い知見に基づき、原子力規制委員会との間で対話を行い、原子力発電所の安全性の確保に寄与することを期待
- ATENAには、安全性向上という同じゴールを目指している組織として、規制当局側の技術的課題の解決に向けて、双方向コミュニケーションの進化を期待
- 規制側と産業側の立場の違いを越えて、規制当局と円滑な議論を進める上で、米国のNEIのような、大学や研究所の人々も含む、専門性のある人材を抱えた組織が参考になるのではないか

●投資回収に係る環境整備、バックエンドの制度措置等

- 廃止措置を着実に実施するための方策を検討することは喫緊の課題。事業者間の取組は勿論、一定の国の関与も必要
- 電力自由化の中で、原子力事業を着実に進めていくための適切な手当は必要
- 今後容量市場等の制度も動き出す中で、脱炭素電源の投資促進の議論も進められているが、原子力も公益性ある電源としての取組が求められるのではないか
- 原発の廃炉は、公益的課題への対応に不可欠な費用として、その在り方について深掘りすべき時期に来ているのではないか

2-④. 開発プロジェクトマネジメントの強化

- 過去の研究開発における「護送船団方式」から脱却すると同時に、導入後も見越してプロジェクトベースの開発を進めていくにあたり、開発プロジェクトのマネジメントの強化を進めていくことが必須。

【司令塔機能の創設と役割分担の明確化】

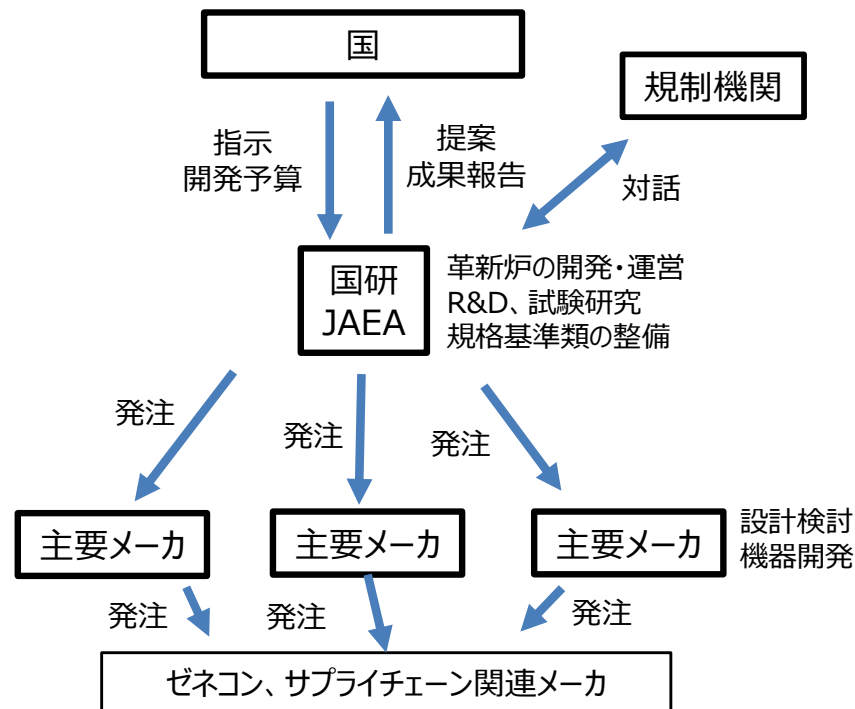
- これらの達成へ、ステークホルダーと能動的に調整を行いつつ、システム全体を一貫性をもって管理する、研究開発プロジェクトの「ヘソ」となる機能（司令塔）を創設することが必要ではないか。
- あわせて、システム設計や発注を統括する中核企業を設定し、プロジェクトへの産業界の参画を効果的に確保することとしてはどうか。
- 国研（JAEA）は、司令塔機能の設置・運営や、民間企業への技術支援に主体的に関与しつつ、独自の機能としては、開発に必要な基盤インフラの整備、（プロジェクトベースの取組と対比した）熟度の比較的低い研究や人材育成・基準規格等の基盤整備に注力する等、関係者の役割分担を明確化してはどうか。

【プロマネ等に通じた民間人材の活用】

- 海外では、開発プロジェクト自体に、プロマネの知見を有する民間企業の人材・ノウハウを取り込むべく、様々な官民連携の手法を工夫。
- 我が国においても、司令塔機能に、ユーザー／オペレーターとしての知見を有する電力会社等、民間企業のプロマネ人材・知見を取り込むことが必須。具体的なチーム組成に向けて、官民協働の枠組みを作っていくべきではないか。

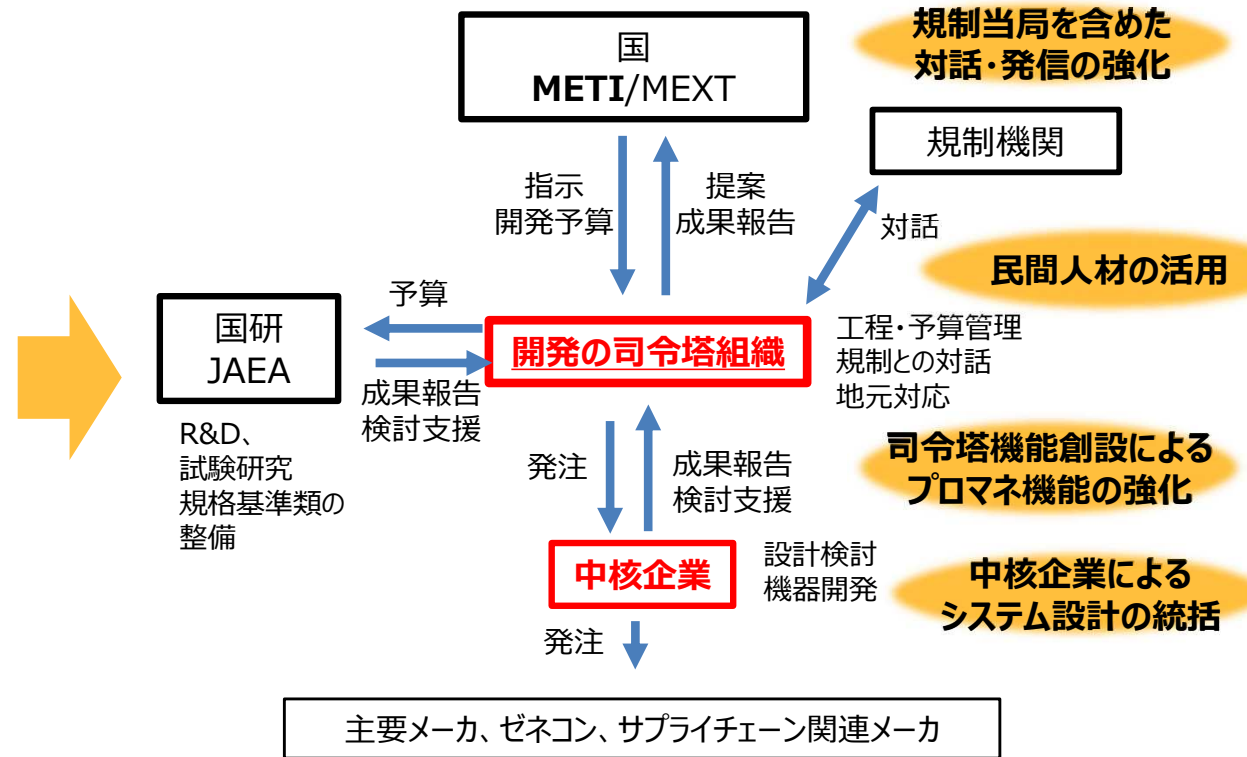
2-④. 民間のイノベーションを喚起する開発の司令塔・基礎基盤の整備

従来の開発体制（例：もんじゅ）



今後の開発体制の方向性（案）

<新たな開発体制の例>



- ✓ 司令塔組織創設によるプロマネ機能の強化
- ✓ プロマネ等に通じた民間人材の活用
- ✓ 中核企業によるシステム設計の統括
- ✓ 規制当局を含めた対話・発信の強化

2－⑤．サプライチェーン各工程に即した多様な支援メニューの整備・導入

- 事業環境変化やプロジェクト不在の期間長期化で、ものづくりの技能・人材維持や事業継続といった課題があらゆる工程で顕在化。こうした悩みは、サプライチェーン階層ごとに様々に異なっており、ニーズに応じたきめ細やかな支援メニューを準備し、ハンズオンで積極サポートを行うべきではないか。

【海外プロジェクトへの効果的な参画サポート】

- 炉心・圧力容器等の枢要機器の製造工程では、長期間にわたりプロジェクトがない中で、エンジニアリング・機器製造能力の維持が大きな課題に。従来の「日の丸フルセット展開」が困難な中、個別サプライヤ自らの販路開拓へ、政府による海外プロジェクトへの参画サポート（顧客確保・海外規格取得への支援、トップセールス等）を積極的に行ってはどうか。

【部品・素材の供給途絶対策、事業承継支援等】

- 素材・部品製造工程等を中心に、材料の供給途絶リスクが高まっているほか、中小・小規模事業者における事業承継も大きな課題に。産業大での実態把握・支援体制の構築に加え、こうした枠組みも通じ、事業承継等に対する政策支援ツールの最大限の活用を働きかけていくべきではないか。

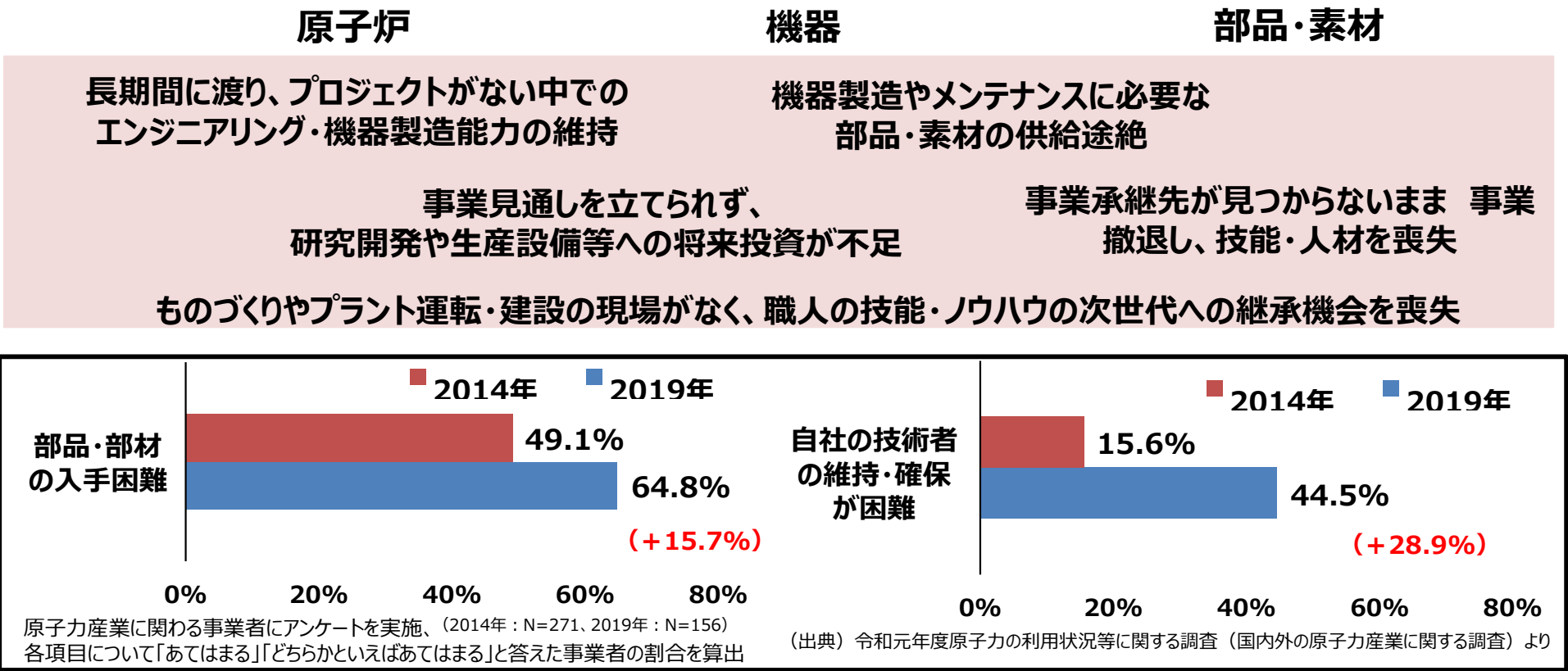
【人材育成・技術承継支援】

- 全般的課題である現場をはじめとした技術基盤の維持へ、デジタル技術の活用（省人化）や業界横割りの人材育成システムの構築等を進めるべく、政府も積極的に支援していったらどうか。

2 – ⑤. 原子力産業のサプライチェーン強化に向けた課題と対策

- 震災後の事業環境の変化の中で、原子力産業サプライチェーンの強化にあたっての課題は、サプライヤの競争環境や事業規模により様々であり、きめ細かい支援メニューが必要に。

原子力産業
の課題



対応・支援策

A. 海外プロジェクトへの効果的な参画
(革新サプライヤチャレンジ)

B. 部品・素材の供給途絶対策
(一般産業品、AM技術の活用等)

C. 中小・小規模事業者等の事業承継支援

D. 人材育成
(スキル習得講座・研修の充実、デジタル技術利活用等)

2-⑤-A. 海外プロジェクトへの効果的な参画（革新サプライヤチャレンジ）

- 海外では政府の大規模支援の下、革新炉の実機プロジェクトが進展する中、国内プロジェクトは不在。エンジニアリング・機器製造能力の維持や研究開発・生産設備等の将来投資の不足が課題に。
- 革新炉向けの機器や部素材の設計・開発・実用化に挑戦する国内サプライヤでチームを組成し、海外の実機プロジェクトへの参画を官民で支援する仕組みが必要ではないか。

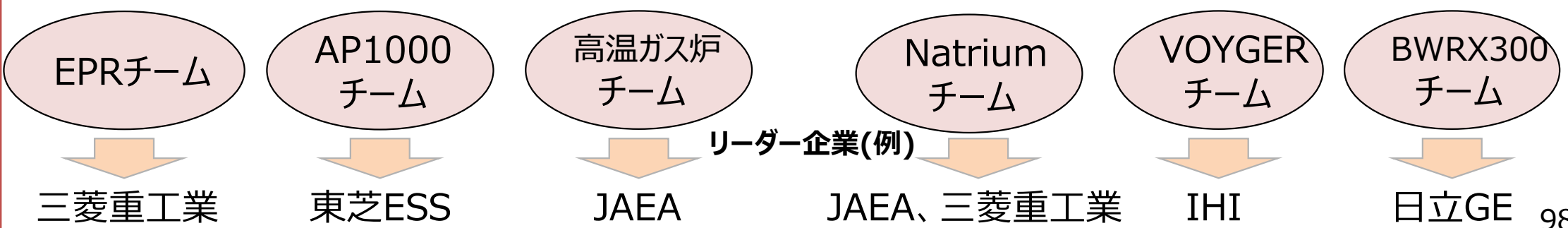
革新炉サプライヤプラットフォーム事務局（仮称）
METI、JAEA、JAIF等

支援メニュー（例）

- ① 炉型毎にJAEAやプラントメーカー等の主幹事を定め、参入ポテンシャルのあるサプライヤを見極め、官民で情報提供
- ② JAIF等と連携し、想定サプライヤの実績や技術的強みを海外プレーヤーに発信
- ③ 政府系金融機関と連携し、ファイナンスによる輸出の後押し
- ④ METIから、海外規格への対応や設備改修に加え、革新炉に対応した機器・部素材の研究開発や性能検証を支援

炉型毎のサプライヤチームを「革新サプライヤコンソーシアム」として認定

「革新サプライヤコンソーシアム」



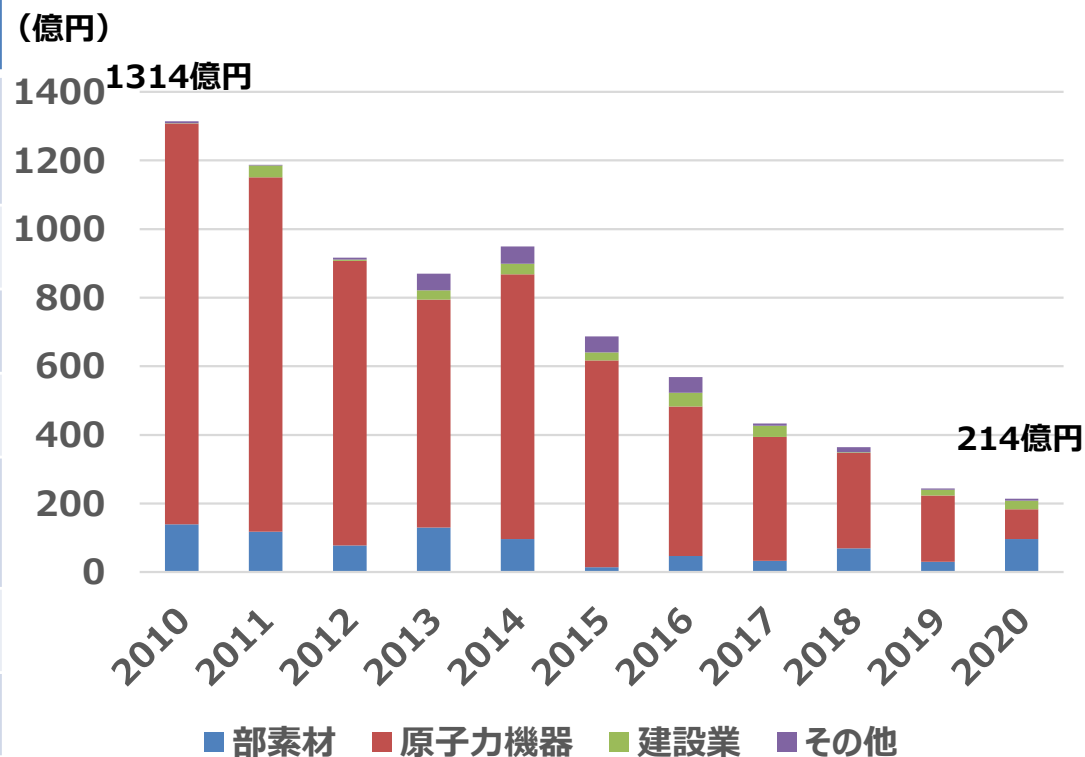
【参考】原子力サプライヤの海外展開実績

- 日本原子力産業の中核部品・部材のサプライヤは、国内での豊富な建設実績を活かして、**海外プロジェクトにも多数参画**してきた。
- 近年では**西側諸国の市場低迷や中韓の国産化率向上に伴い、輸出高は震災前の1/5以下**に。

国内サプライヤー海外輸出実績

メーカー名	部品名	国名（サイト名）
日本製鋼所 M&E	大型鍛造品	英国（HPC）
IHI	格納容器	米国（ボーグル）
日本製鉄	SG管	米国（非公開）
荏原製作所	冷却ポンプ	米国（非公開）
TVE	湿分分離加熱器 逃し弁	中国（三門）
大同特殊鋼	炉内構造物	米国（ボーグル）
東洋炭素	黒鉛材	中国（HTR10）
助川電気工業	模擬燃料集合体	韓国 （韓国原子力研究所）

原子力関係輸出高推移



（出所） 各社ヒアリングに基づき資源エネルギー庁にて資料作成

（出所） 日本原子力産業協会資料に基づき資源エネルギー庁にて資料作成

【参考】海外展開における課題及び今後の方策

- サプライヤの海外進出にあたって、①海外規格の取得・維持、②海外案件のオンタイムな情報収集、③現地での継続的なメンテナンスサービスの提供等が課題。
- こうした課題を克服し、メーカー・サプライヤによる更なる新規事業開拓が可能となるよう、サポートしていくべきではないか。

サプライヤの海外進出における課題

- ✓ 仕様がみえないと開発を社内で通せないため、炉型の設計情報を持つプラントメーカーとの連携が重要。
- ✓ 維持費が高額かつ原子力は取替需要が低いので規格を保有し続けるメリットが薄い。
- ✓ アメリカはアメリカの規格、ヨーロッパはヨーロッパの規格となっており、規格の種類が多い。グローバル企業でもない限り全ての資格を保有し続けることは困難。
- ✓ 自社単独で海外案件に働きかけることには限界。規格取得しても維持費がかかるだけ。
- ✓ 海外進出した後のメンテナンスの提供が課題。技術移転するか子会社設立が必要となりコストがかかる。



国内サプライヤの海外進出には、

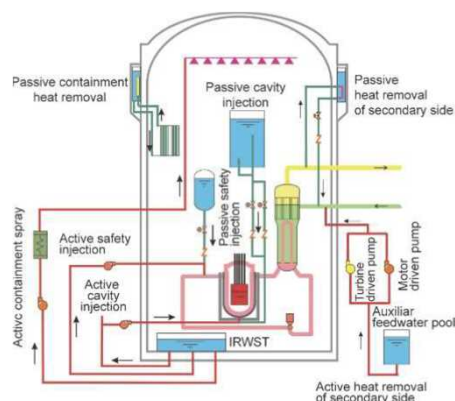
①規格取得支援、②海外プロジェクトに関する情報提供、③現地サポート 等の包括的なサポートが必要に

【参考】海外プロジェクトへの参画支援例

- 海外プロジェクトへの参画には、海外規格取得や海外独自の仕様への対応に、一定の投資が必要。他方で、サプライヤは、今後継続的な受注が見通せない中では投資を逡巡。
- そのため、サプライヤによる海外案件獲得に向けた投資を支援するとともに、調達元へのファイナンス支援を組み合わせ、サプライヤの海外プロジェクトへの参画を促してはどうか。

海外輸出のための規格取得支援

- ✓ バルブアクチュエータは、近年国内市場が低迷しており、製造・検査等の技能承継が課題。
- ✓ 日本ギアのバルブアクチュエータは、国外革新軽水炉市場にポテンシャル。
- ✓ 現地競合企業に対して、品質・技術面では勝機がある一方で、入札参加に向け、現地規格取得がネックに。



輸出部品の一例

プラントメーカーとの連携

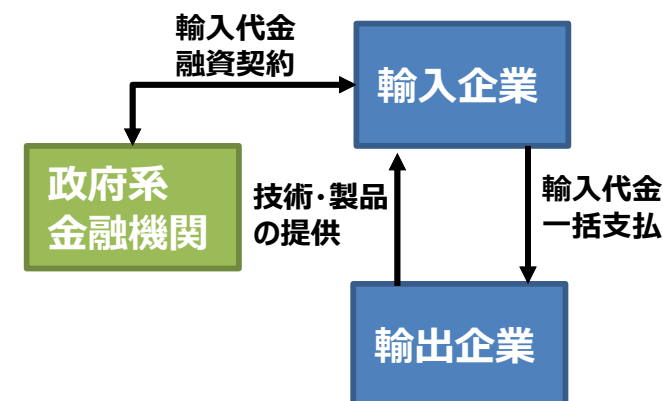
- ✓ BWRX-300は、2028年頃の運転開始を目指し、要素技術実証を推進中。
- ✓ 日立GEは、炉型情報とサプライヤの技能を勘案した上で、岡野バルブをパートナーとして、格納容器一体型バルブの開発に取り組み、将来の小型軽水炉市場でのポジション確保を狙う。



NuScale VOYGR 外観図

ファイナンスによる輸出支援

- ✓ 複数の建設プロジェクトを進めていくことを表明した海外諸国が抱える大きな課題の一つは資金調達。
- ✓ 金融機関と連携し、輸出代金分のファイナンスに加え、一部ローカルポジションについても融資を行うことで資金調達に貢献し、日本サプライヤの案件獲得を後押し。



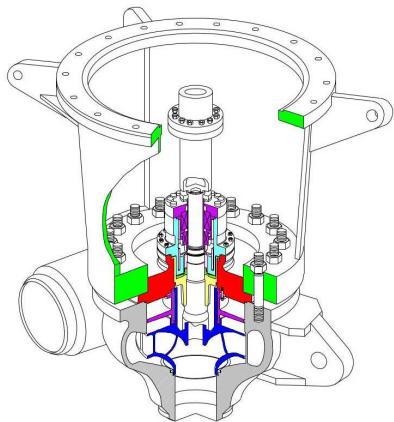
ファイナンススキーム

2－⑤－B. 部品・素材の供給途絶対策

- 震災後の事業環境の変化に伴い、機器製造やメンテナンスに必要な部品・素材の供給途絶が発生。
- 個社の垣根を越え、プラントメーカーによるサプライヤの実態を把握する体制を構築し、供給途絶可能性を事前に把握するとともに、仮に、部品・素材の供給途絶が発生する場合にも、一般産業品や3Dプリンタによる製造品の活用が可能となるよう、業界大での供給途絶対策を推進していく。

BWRサプライヤの体制構築

- ✓ BWRの原子力発電所は、未だ再稼働に至っておらず、サプライヤにとっては厳しい事業環境。
- ✓ そのような環境を踏まえ、プラントメーカーが主体となり、サプライヤの実態を把握、事業継続の危機にあるサプライヤの特定を可能とする体制を構築。
- ✓ 特定後は、どのように製品の供給を継続できるかの検討を行う。



事業危機にある部品例（PLRポンプ）

一般産業品の活用に向けた取組

- ✓ 原子力産業は厳しい安全基準やトレーサビリティが要求されており、一般産業向け製品活用が進まず。
- ✓ 一方で、厳しいサプライヤの事業環境を考慮すると、原子力専用品だけでサプライチェーンを構築することは困難。
- ✓ 一般産業品を原子力発電所に採用した場合のデモンストレーションを行い、得られたデータよりガイドラインの整備を実施。

※米国では1980年代より一般産業品の活用を検討、EUでも近年同様の動きが。

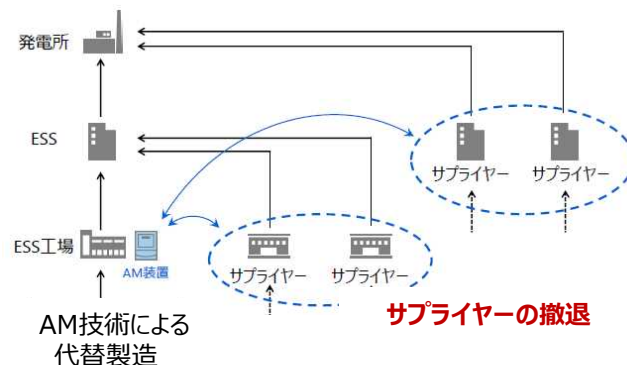


デモンストレーション例 リードスイッチ

3Dプリンタの活用に向けた取組

- ✓ 3Dプリンタによる原子力部品の製造を可能にすることで、代替調達手段の確保が可能。
- ✓ そのためには、実際に3Dプリンタで製造した製品が実プラントに適用できるかの検証が必要。
- ✓ 原子力産業に3Dプリンタを活用するために、試作・データ取得を行い、規格化を推進。

※米国では2019年に3Dプリンタ導入のためのロードマップを策定。NRCも2021年にガイドラインを策定。



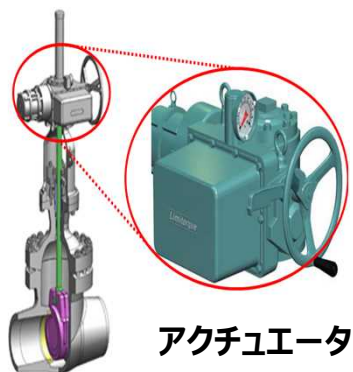
3Dプリンティングによるサプライヤー補完のイメージ 102

2 - ⑤ - C. 中小・小規模事業者等の事業承継支援

- 事業環境の変化により、上流の機器等への発注が激減した結果、事業を維持することが困難となった中小・小規模事業者は、事業承継先が見つからないまま事業撤退し、技能・人材を喪失する例も。
- 承継先企業の紹介や政府系金融機関による支援等を通じ、ニーズのある企業による事業継承・再編を支援する仕組みが必要ではないか。

技術・サービスの承継

- ✓ 電動弁の駆動装置(アクチュエータ)内の直流モータの製造企業（甲府明電舎）が2022年の撤退を表明。
- ✓ 製造中止を踏まえ、日本ギアが設計を引き継ぎ、代替サプライヤーによる製造・性能検査を推進。



アクチュエータ

中小・小規模事業者の再編

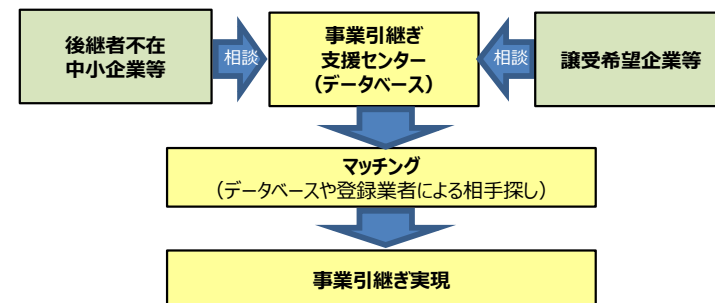
- ✓ もんじゅのバルブを製造するにあたり、バルブメーカー3社が開発・製造を実施。
- ✓ その後の厳しい事業環境の中で開発・製造に関与していた会社の内2社が原子力事業より撤退。
- ✓ 平田バルブは自社のバルブ事業の強化のために、撤退する2社の原子力事業を吸収し、もんじゅのバルブ製造の技術を維持。



ベローズ弁

事業承継支援の例

- ✓ 円滑な事業承継をサポートする事業承継・引継ぎ支援センターを設置。
- ✓ 後継者不在の企業と事業を譲り受けた企業とのマッチング等を支援。
- ✓ その他、M&A時の専門家活用を支援し、経営資源の引継ぎを後押し。



事業承継支援 スキーム図

2-⑤-D. プラント運転やものづくりの現場での人材育成

- プラント運転・建設やものづくりの現場がなく、職人の技能継承や人材育成の機会を喪失。
- 先行再稼働プラントへの運転員の派遣等の電力大での取組が進展。また、デジタル技術の活用等を通じ、ものづくり企業の技能継承を支援。
- さらに、原子力関連企業による公的なスキル習得支援制度の活用を促進してはどうか。

電力事業者での取組

- ✓ 再稼働が遅れている電力の運転要員を再稼働済の原子力プラントに派遣し、プラント運転を実習。
- ✓ 電力会社・メーカーで運転訓練センターを設立し、運転シミュレータ等を活用した運転員の教育・訓練を実施。

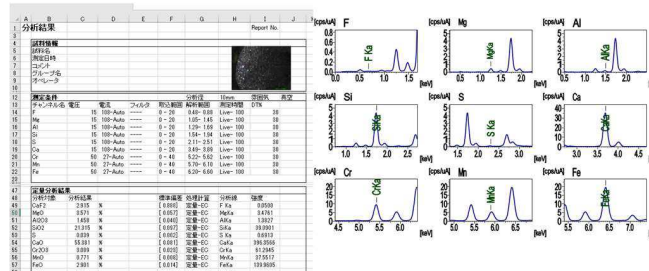
PWR：(株)原子力発電訓練センター
(所在地：福井県 設立：関電・九電・三菱重工 等)
BWR：(株)BWR訓練センター
(所在地：新潟県 設立：東電、中部、東芝、日立 等)



運転シミュレータ

デジタル化による省人化

- ✓ 大型鋳鍛造品のプロセス管理は作業者の経験・技能に基づいた職人のノウハウに依存。
- ✓ 計測機器等の導入により、管理状況をデータ化し、オンタイムで分析する品質管理システムを導入。



1. 革新炉開発の課題の整理

- ①革新炉開発の方向性（時間軸）の明瞭化
- ②予算（開発、施設整備）の整備
- ③制度（規制、ファイナンス等）の整備
- ④革新炉開発の体制の整備
- ⑤サプライチェーンの維持・強化

2. 課題への対応の方向性

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

● カーボンニュートラルとエネルギー・経済安全保障の両立に向けた革新炉の貢献の可能性

- ー カーボンニュートラルに向けた革新炉によるエネルギー・経済安全保障への貢献

（例）地政学リスク、レジリエンス・セキュリティリスク、産業の空洞化リスク等への対応、循環型エネルギーへの挑戦、

異分野イノベーションへの貢献 等

- ー 各炉型の評価と評価軸の考え方

● 革新炉開発における課題と対応策

- ー 革新炉開発に係る方向性の明瞭化
- ー 開発予算・施設の整備
- ー 革新炉開発を支える事業環境の整備
- ー 開発の司令塔機能の強化
- ー サプライチェーンの維持・強化

3. 中間報告に向けた論点整理（たたき台）

● 革新炉開発を巡る悪循環を断ち切る対応の方向性

ー 2050年カーボンニュートラルに向けた革新炉開発ポートフォリオとロードマップの在り方

（例）中長期の政策方針に関する予見可能性の確保、開発ポートフォリオの明確化、技術毎のロードマップの策定

ー システムエンジニアリング機能を強化するプロジェクトの創出

（例）プロジェクトベース、インフラベースでの研究開発支援の強化

ー 事業環境の整備

（例）革新炉の円滑な導入に向けた規制当局との対話、投資回収期間の長期化への対応、バックエンド問題への対応

ー 民間のイノベーションを喚起する開発の司令塔

（例）司令塔機能の創設と役割分担の明確化、プロマネ等に精通した民間人材の活用

ー 革新炉サプライヤの挑戦の支援

（例）海外プロジェクトへの効果的な参画支援、部品・素材の供給途絶対策、事業承継や、人材育成・技術承継支援

参考資料集

【参考】日本国内炉型技術開発における評価基準

- 日本国内でも、米国ARDPにおける評価軸を参考に、技術成熟度や市場性等を評価軸として民間の炉型開発を支援。

社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業（経産省補助事業）の審査項目

（１）技術の成熟度と必要な研究開発

- 技術成熟度の高さ **+ 時間軸**
- 必要な研究開発項目

（２）実用化された際の市場性

- 海外または国内におけるニーズを踏まえた市場性に関する分析は十分か
- 経済性に関する分析・評価が十分か
（代替・競合技術と比較した競争力分析・評価、将来的な経済性向上に向けた見通し含む）
- 負荷追従、発電以外の多目的利用（水素製造含む）等の機動性を有するか
- 放射性廃棄物の減容・有害度低減、資源の有効利用性の点で優位性があるか

（３）具体的な開発体制の構築と国際的な連携体制

- 実用化までの開発計画・開発体制は現実的なものか
- 提案者の事業実施体制は十分か（若手の割合含む）
- 想定されるサプライヤーの体制（脆弱性・海外サプライヤーと比較した場合の優位性）は十分か
- 潜在的ユーザー・JAEAとの連携

（４）実用化する際の規制対応

- 安全確保に対する基本的な考え方、深層防護、事故シークエンス、外部ハザードに対する安全対策は十分か
- 実用化までに検討することが必要な安全設計方針・要件は十分か（安全性試験等を通じたデータ取得含む）

（５）その他

- 非エネルギー分野での貢献

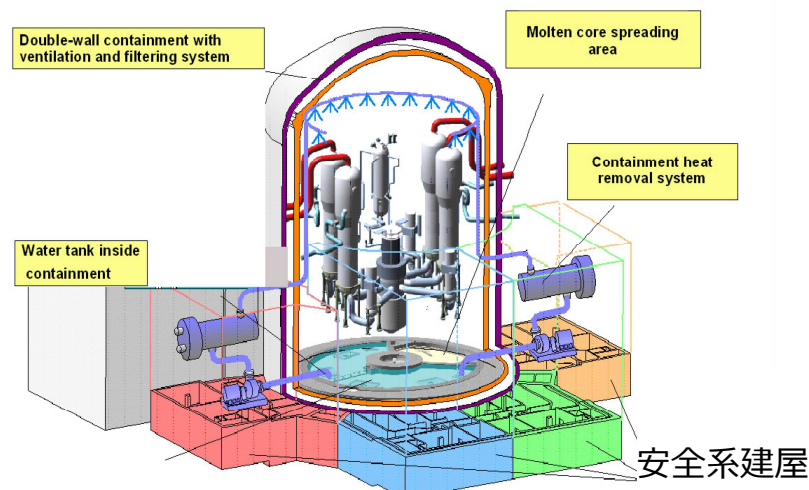
【参考】革新軽水炉の特徴

- ＜定義＞ ● 既設の原子炉（PWR及びBWR）の設計をベースに**新技術（受動安全やデジタル技術等）**を導入した軽水炉
- ＜利点＞ ● 既存軽水炉技術ベースで**技術成熟度が高く**、規制プロセスを含め**高い予見性**
● **受動安全や航空機衝突対策を含む外部事象対策**による更なる安全性・信頼性向上、
運転性・操作性の向上
● **シビアアクシデント対策**による事故時の影響緩和
- ＜課題＞ ● 大きな**初期投資負担**
● **建設長期化**した場合の**大きなファイナンスリスク**

EPRの事例

安全性・信頼性の向上

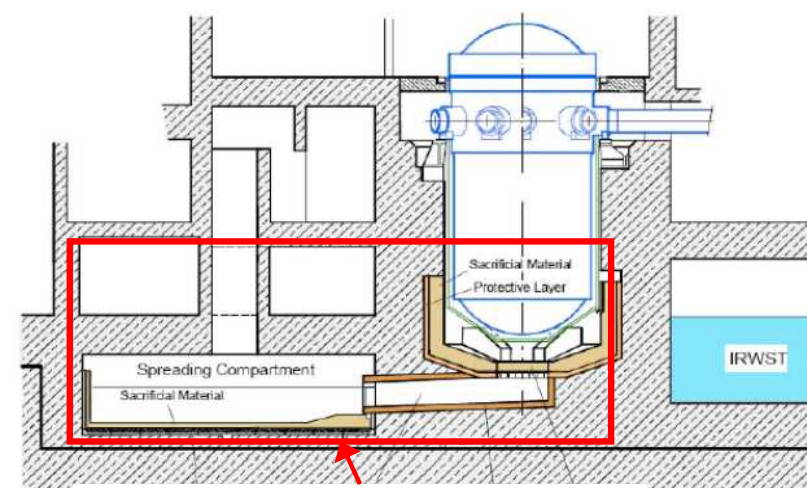
安全系の完全分離※



※各種ハザード対策として安全系建屋に1系統ずつ分離配置

シビアアクシデント対策

コアキャッチャーで溶融炉心を保持及び冷却



コアキャッチャー

開発課題（革新軽水炉）

＜開発課題（例：三菱次世代軽水炉、iB1350）＞

- 1F事故を踏まえた更なる安全性向上のための新技術の開発及び検証
- 過酷事故時の被ばく低減技術（放射性物質閉じ込め・除去技術）の開発・実証試験
- 安全性向上に向けた新型燃料開発（事故耐性燃料／高燃焼度燃料）
- 解析コードの開発(SA事象進展評価)、被ばく評価 等
- iPCCS(革新的静的格納容器冷却系)/iCC(革新的コアキャッチャー)の実証試験
- 二重円筒格納容器の開発

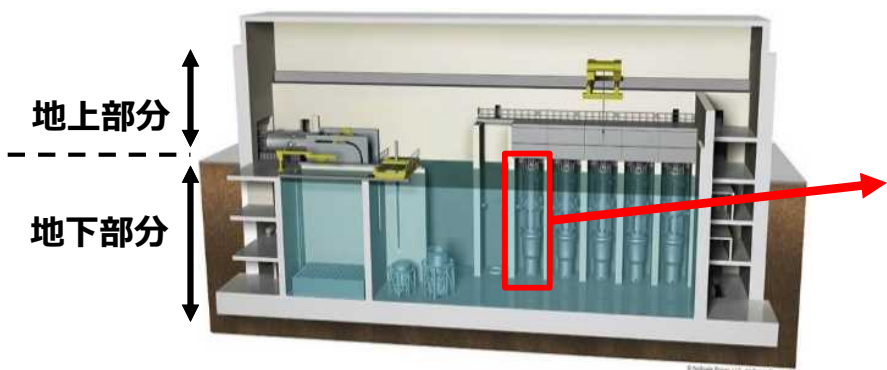
【参考】小型軽水モジュール炉（SMR）の特徴

- ＜定義＞ ● 電気出力が概ね30万kW以下の小型かつモジュールで製造される新型原子炉
- ＜利点＞ ● 炉心が小さいため、自然循環で確実な冷却（事故・避難も小規模に）
● モジュール工法で工期短縮・初期投資抑制
- ＜課題＞ ● 小型のため日本の安全規制環境下における経済性懸念
● 海外先行で、安全規制等の整備にも時間を要する

NuScale社の事例（VOYGR）

短い工期

モジュール工法で工期短縮・
初期投資抑制



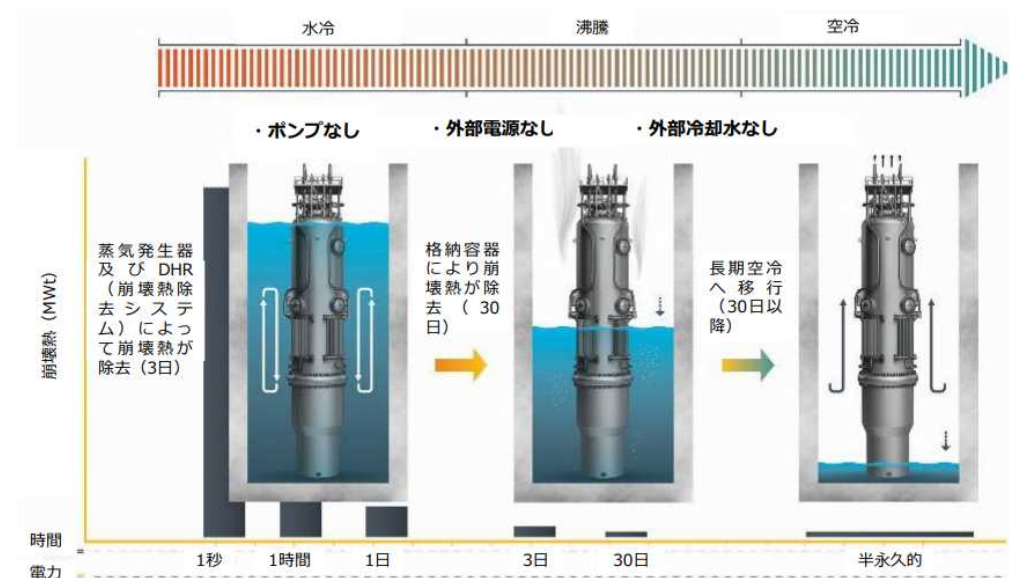
小さな炉心

事故時の影響を小規模に



自然に冷える

自然循環で確実な冷却



開発課題（小型軽水モジュール炉）

	海外（例：Nuscale VOYGR、BWRX-300）	国内
構造部材	● 国内規制適合のための耐震性向上 ● 格納容器構造材料・原子炉建屋材料の製造技術成熟度向上 ● RPV一体型隔離弁の開発 ● 中性子検出器の設計	● 一体型原子炉構造、炉内構造物の開発・実証（構造/耐震/炉内流動他） ● 格納容器構造部材の開発
安全性	● 制御棒駆動ピッチ縮小に対応した制御棒駆動装置モータ部の開発 ● チムニ内での蒸気流れ・蒸気凝縮特性の実温・実圧データの取得 ※受動安全については米国内で実証済	● 小型炉向け内装制御棒駆動装置機構の開発 ● ヘリカル型蒸気発生器の開発・実証（流動/伝熱特性） ● 静的安全システムの開発・実証 ● 国内耐震条件等への適合性評価
炉心燃料	※PWR/BWR等で海外で既に実績あり。	※PWR/BWR(新燃料については海外での実績)で既に実績あり。
評価手法	※PWR/BWR等で海外で既に実績あり。	※PWR/BWR(一部技術は海外での実績)で既に実績あり。
その他	● モジュール工法の確立（※モジュール工法とする場合）	同左

【参考】ナトリウム冷却高速炉の特徴

- ＜定義＞

● **高速中性子**により、核分裂連鎖反応が維持される原子炉
- ＜利点＞

● 優れた**安全性**（自然に止まる・冷える・確実に閉じ込める）

● **資源の有効利用**、Pu・MA※燃焼により高レベル放射性廃棄物の**減容化、有害度低減**

● 高温/低温（約500℃/約200℃）を活用した**熱利用**

● ほぼ常圧であるため、薄肉構造が可能(経済性向上)かつ液位確保が容易(安全性向上)
- ＜課題＞

● 化学的に活性な**金属ナトリウムの取扱い**

● 日本が国際安全基準の議論をリードするも、**安全規制等の整備**に時間を要する

● **導入に向けた実証、3次元免震装置・MAを含有したMOX燃料製造技術等の開発**
- ※マイナーアクチノイド：半減期が長く、強い放射線を発する

熱利用

熱利用システム (イメージ)

タービン

蒸気発生器

熱利用システム

熱利用の例

低温利用	海水淡水化、地域暖房
高温利用	水素製造、熱貯蔵

優れた安全性

自然に止まる、自然に冷える
確実に閉じ込める

制御棒の自然落下

冷却材の自然循環

大気放熱

中間熱交換器

炉心

溶けた燃料を炉内で保持

二重容器

ほぼ常圧（軽水炉は70～150気圧）
冷却材が漏れても、外側容器等（二重構造）で容易に保持可能

資源の有効利用

長期にわたり天然ウラン供給が不要
(3000年以上※のエネルギー供給が可能)

高速炉の使用済み燃料 (MA, Pu含む)

→ : 燃料の流れ

高速炉

MA, Puを燃焼

燃料製造

高速炉燃料再処理

MA, Pu

軽水炉の使用済み燃料 (MA, Pu含む)

軽水炉で発生する MA, Puも燃料となる

廃棄物の有害度低減

低減期間の短縮
約300年 ← 約10万年

有害度 (Svの相対値)

1年 百年 万年 百万年

経過年数

直接処分

300年

10万年

高速炉再処理

軽水炉再処理

— 1年間の軽水炉運転に必要な天然ウランの有害度に相当

※※ 出典：OECD/NEA Nuclear Energy Outlook2008

開発課題（高速炉）

<概念検討に必要な研究開発>

- 炉心燃料／安全分野（受動的炉停止、炉心溶融事故対応機器等）
- 原子炉構造分野（原子炉耐震評価、燃料交換機等）
- 冷却系分野（ポンプ回転安定性、中間熱交換器熱流動等）
- BOP分野（電気計装、建屋、保守含む）（3D免震、検査装置等）
- 規格基準（設計・建設規格、維持規格等の整備、新材料への対応）
- AtheNa試験（機器実証試験）

<炉側の基盤技術開発>

- 導入のための基盤技術（高燃焼度燃料、安全評価手法等）

<サイクルの技術の具体的検討に向けた開発>

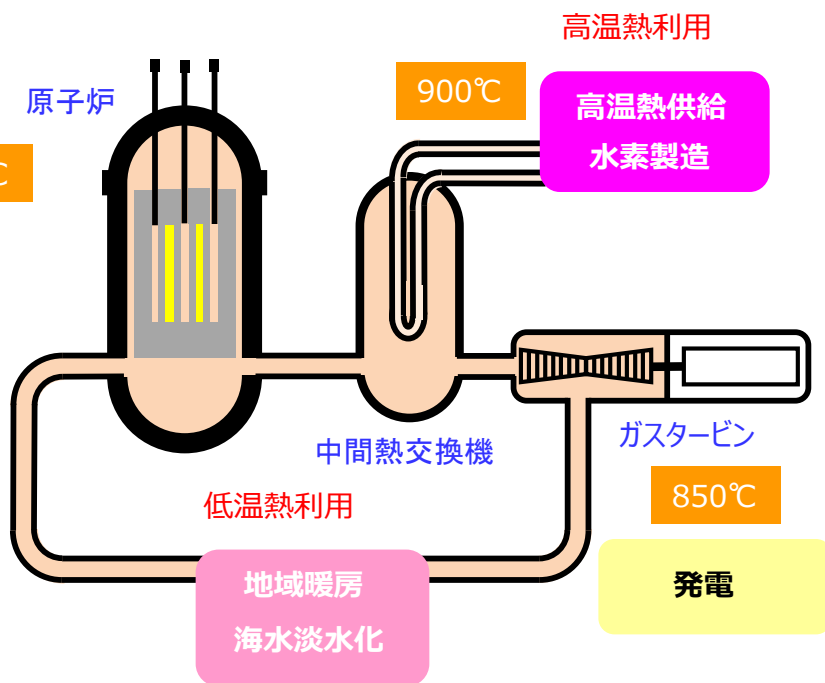
- 燃料のサイクルシステムのフィージビリティ、候補プロセス・機器開発

【参考】高温ガス炉の特徴

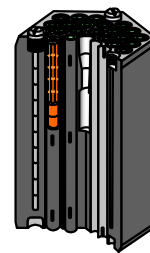
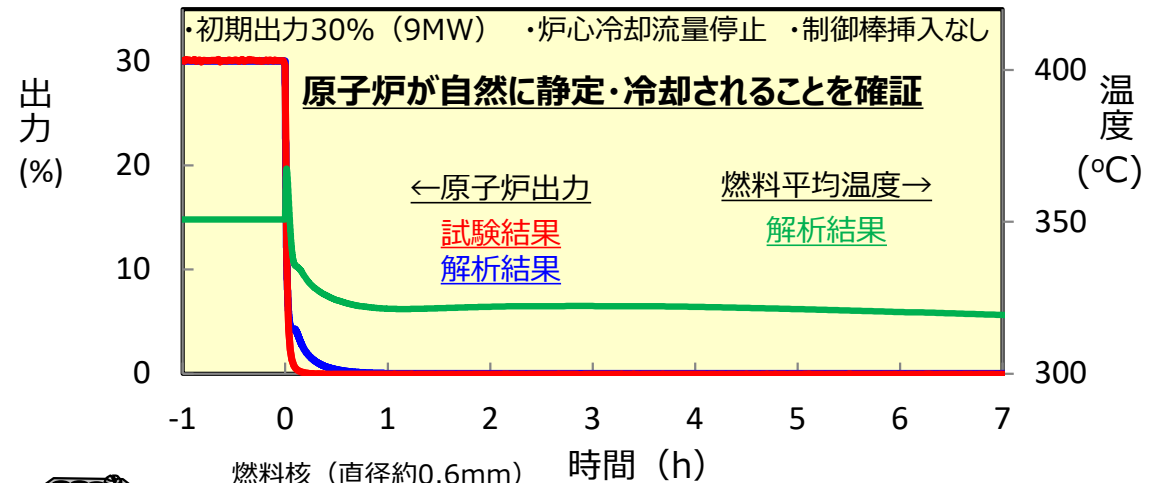
- ＜定義＞ ● 減速材に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを用いて、900℃近くの熱を利用できる原子炉
- ＜利点＞ ● 高い固有の安全性（炉心溶融、大量の放射性物質の放出なし）
 ● 高温で安定なヘリウム冷却材を利用水素爆発しない
 ● 高温の熱を利用し多目的の利用が可能（水素製造、発電、地域暖房等）
- ＜課題＞ ● 燃料を再処理する場合には、ホット施設*での技術の実証が必要
 ● 導入に向けた実証、原子炉と水素製造施設の接続技術、カーボンフリー水素製造技術の確立が必要

*放射性物質を取り扱うことが可能な施設

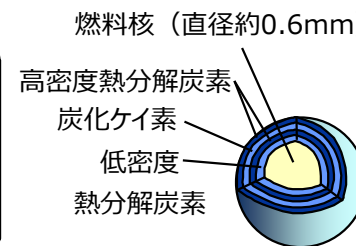
多目的な熱利用



高い固有の安全性



燃料体（黒鉛）



被覆燃料粒子

- 物理現象のみで、黒鉛構造材が熱を蓄熱・放熱し、被覆燃料粒子の健全性を維持
- 燃料を厳重（四重）に被覆するので、高い放射性物質の閉じ込め機能を有する。

開発課題（高温ガス炉）

＜開発課題＞

- 水素製造施設の一般産業法規での建設を可能とする高温ガス炉の安全設計の確立
- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に必要な技術（機器、システム設計、安全評価）の確立
- 実用高温ガス炉用規制基準、規格基準の策定
- 大型の機器開発
- 高温ガス炉システムの総合性能確証（試験インフラの整備を含む）
- HTTRからの大型化に向けた炉心・安全解析評価法の確立
- HTTRからの経済性向上に向けた炉心燃料開発
- コスト実証、許認可実証による事業リスク低減（実証炉建設・運転など）
- 核燃料サイクルシナリオの策定と必要技術（再処理など）の開発