

次世代革新炉の検討課題 (高速炉・高温ガス炉実証炉、SC・人材)

令和5年12月11日
資源エネルギー庁

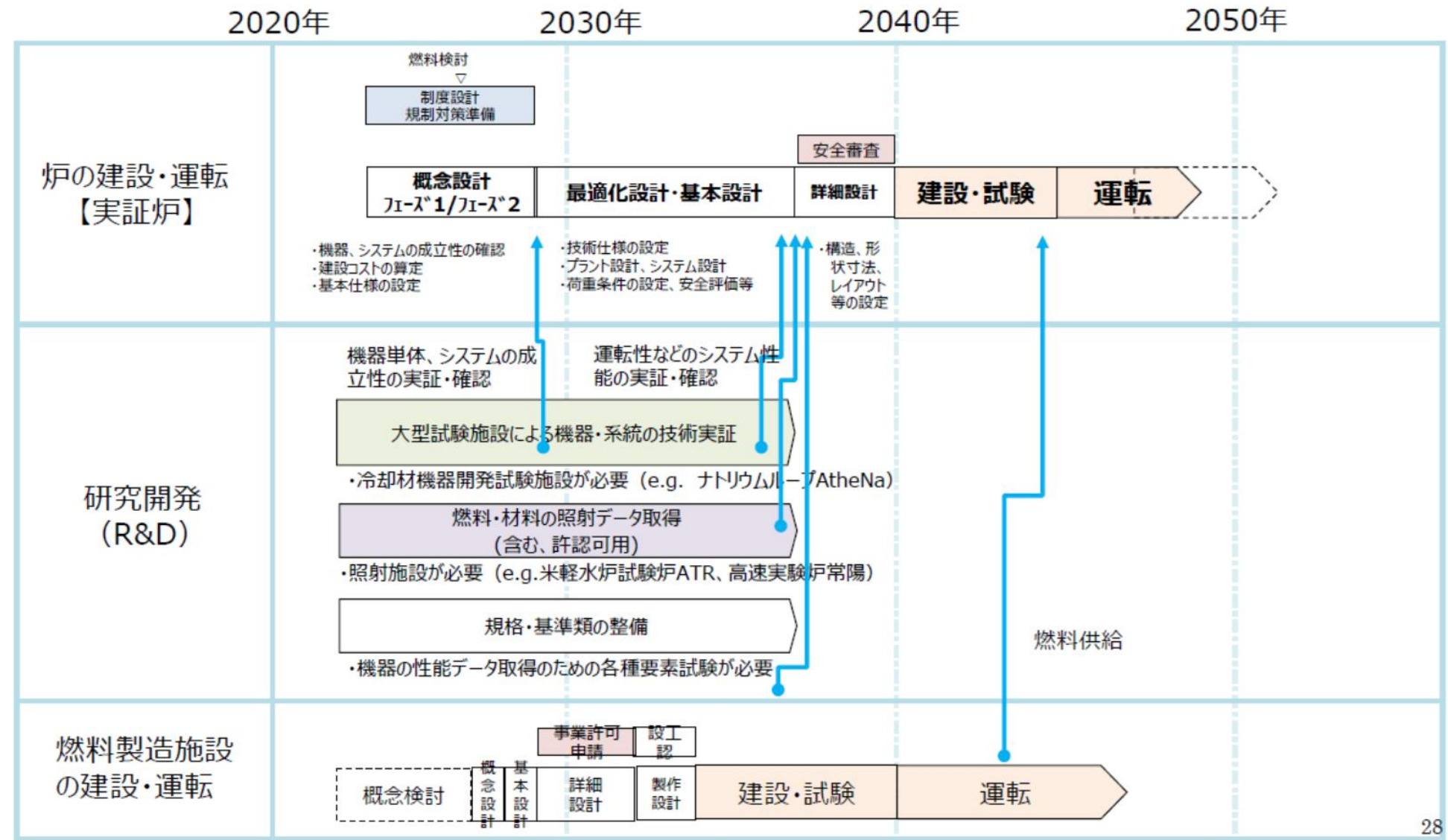
1. 高速炉・高温ガス炉実証炉

2. サプライチェーン・人材

導入に向けた技術ロードマップ°（高速炉）

※事業者等からの個別のヒアリングを踏まえて、「研究開発を進めていく上での目標時期」として策定したもの。

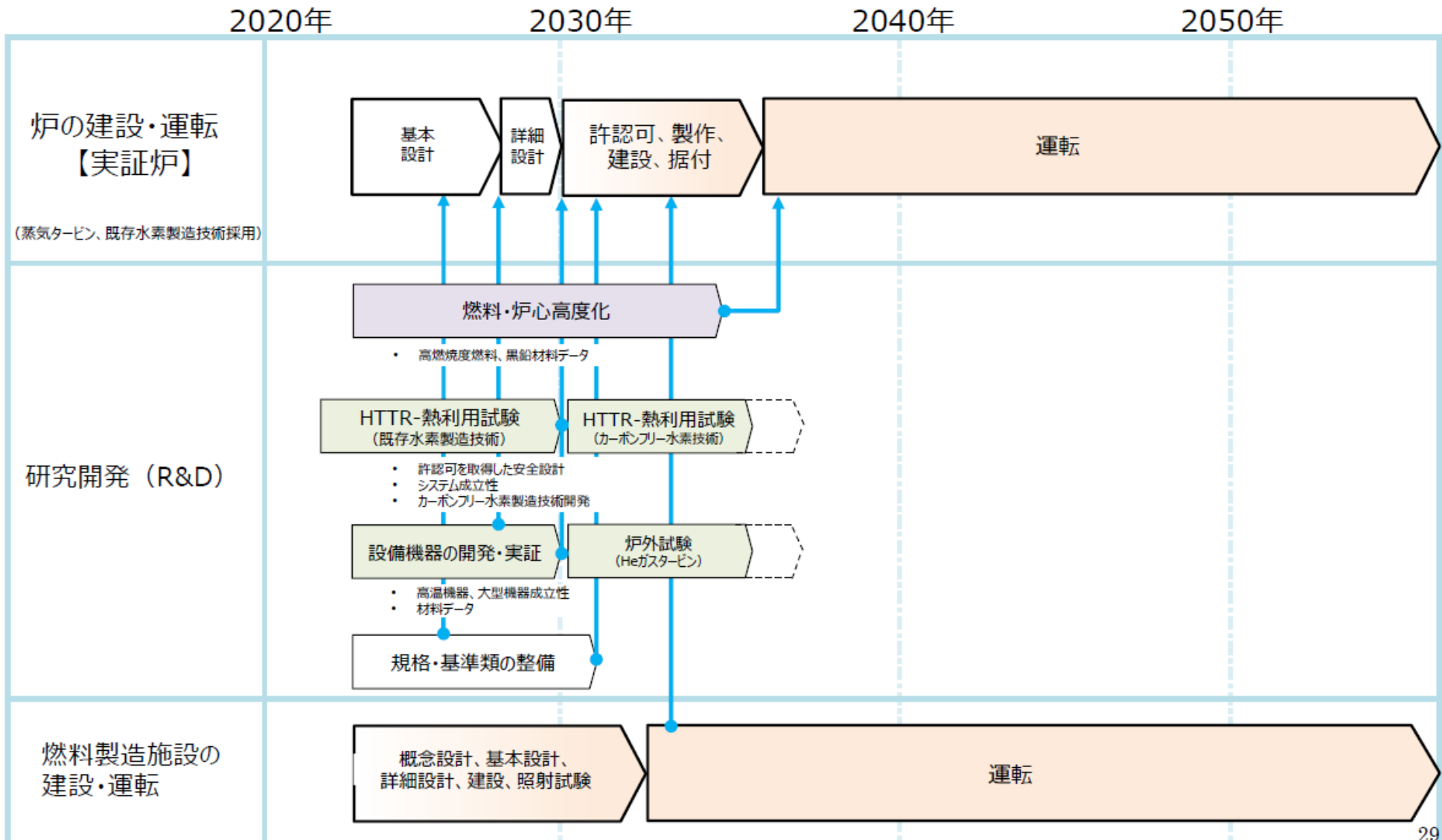
（実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。）



導入に向けた技術ロードマップ（高温ガス炉）

※事業者等からの個別のヒアリングを踏まえて、「研究開発を進めていく上での目標時期」として策定したもの。

（実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。）



高速炉・高温ガス炉の技術ロードマップ（今後の取組の方向性）

- 本ワーキンググループの「カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ（骨子案）」では、革新炉開発を巡る悪循環を断ち切る対応の方向性のひとつとして、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・支援を挙げており、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とした。
- 「GX 経済移行債」による投資促進策として、高速炉・高温ガス炉の実証炉開発に関する予算を、今年度から3カ年でそれぞれ460億円、431億円措置し、事業を開始したところ。
- また、技術ごとの導入の時間軸のイメージを示し、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については、継続的にメンテナンス・改訂していくこととされている。
- 今般、高速炉と高温ガス炉の実証炉開発事業を開始し、中核企業が選定され、それぞれ具体的な炉型が決定したことなどの追加的要素を踏まえつつ、今後の実証炉開発を進めていくため、各事業に則して技術ロードマップをより具体化していく必要がある。
- そのために、中核企業やJAEAにおける要素技術開発の進捗状況や、電気事業者の知見を踏まえ、設計、機器等の実証、照射試験等の具体的なステップや、規格・基準類の整備の進め方、マイルストーンで求められる技術的成果などを関連プレーヤーの参画を得て順次整理する。
- 併せて、当該整理を進めることと並行して、それぞれの実証炉の司令塔組織の具体化に向け、必要な機能やチーム組成の検討を進める。

高速炉実証炉開発における技術的な検討の論点例

- 設計段階による実証炉の仕様（出力、炉心等）決定
 - 機器・システムの成立性確認（耐震性、製造性、燃料概念等）の項目と方法
- 大型試験施設による機器・系統の技術実証
 - 実証すべき機器・系統の特定と、その実証方法
- 燃料・材料の照射データ取得
 - 規制対応も見据えた、照射データ取得の項目と方法（MA含有燃料含む）
- 規格・基準の整備
 - 軽水炉との違いや規制対応も見据えた、整備すべき規格・基準の特定と、必要なデータ取得の項目と方法
- 燃料製造施設の在り方
 - MA含有燃料を含めた、燃料製造技術の検討・開発

等

高温ガス炉実証炉開発における技術的な検討の論点例

- 設計段階による実証炉の仕様（出力、炉心等）決定
 - 機器・システムの成立性確認（耐震性、製造性等）の項目と方法
- 燃料・炉心高度化
 - 高燃焼度化に向けた燃料体（被覆燃料粒子・濃縮度・黒鉛材料等）の在り方
- 熱利用設備（水素製造含む）
 - 設備の安全性確保のための設計の在り方・規制対応上の論点整理、水素製造技術の実用化開発、システム成立性
- 設備機器の開発・実証
 - 実証すべき機器・系統の特定と、その実証方法
- 規格・基準の整備
 - 軽水炉との違いや規制対応も見据えた、整備すべき規格・基準の特定と、整備に必要なデータ取得の項目と方法
- 燃料製造施設の在り方
 - 燃料製造施設・HALEU用濃縮施設の概念検討、製造技術開発

等

1. 高速炉・高温ガス炉実証炉

2. サプライチェーン・人材

原子力サプライチェーンの維持・強化（今後の取組の方向性）

- 原子力産業基盤は次世代革新炉の開発・建設にも不可欠。これまで、今春の「原子力サプライチェーンプラットフォーム」設立以降、全国400社の関連企業に対する実態把握・経営支援強化、原産協会と連携したWebサイト開設、米国への日系サプライヤ団派遣等に取り組んできたところ。
- こうした取組を通じて、国内産業基盤の維持・強化を図っていくとともに、次世代革新炉の開発・建設に向けた技術開発、サプライチェーン構築を目指して、引き続き対応策を検討する。

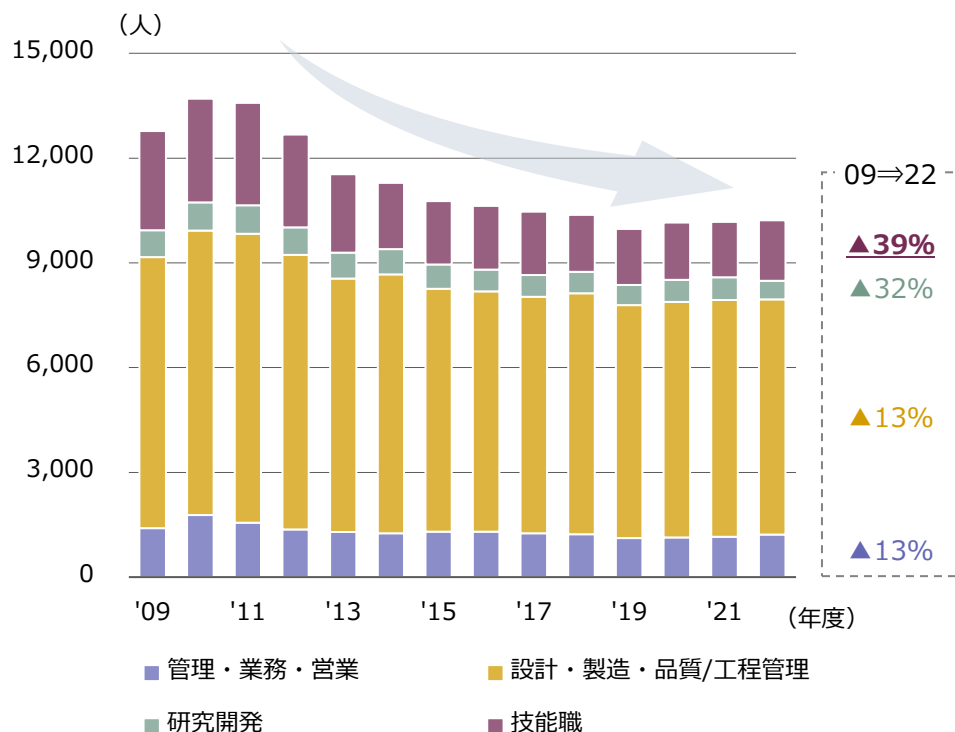
原子力サプライチェーンに関する課題についての指摘

- 原子力に不可欠な人材・技術、サプライチェーンの維持・強化を図っていく上でも、次世代革新炉の開発と社会実装は必要不可欠。原子力発電プラントの建設では、およそ9割を国内で調達しており、技術は国内集積。原子力の持続的活用の観点から、高品質の機器製造、工事保守の供給は必須であり、エネルギー需給率が重要であることと同様、これらが国内で一貫して行われることが重要。
- 人材・サプライチェーンは気が付くと劣化していくといったもので、失われると本当に将来困るというのは、やはり明確にして適切な維持をする仕組みがいる。人材確保については、特に若手の人材確保には夢が必要で、イノベーションというのは本来魅力的なもののはずなので、原子力分野に対する魅力度や将来的なビジョンを示すなど、情報提供の工夫が必要。
- 国内で建設がなく、プラントを建設する技術が劣化していると言わざるを得ない。重要な点は、米国、フランス、あるいは中国、韓国といった国も、日本の技術なしには彼らは建設できないということ。枢要技術を日本が握っているということ。サプライヤを支援して、ビジネス機会を増やすという政策を急ぎ取り組む必要がある。
- 風力が部品数万点に対して、原子力は1,000万点。それだけ数百社のサプライチェーンが発電所の建設にはぶら下がっている。こういう経済を活性化させる効果をきちんと直視するべき。マーケットのニーズと技術の開発の成果をつなげるための条件が必要で、それがサプライチェーンであり人材。

国内サプライチェーンの現状（人材）

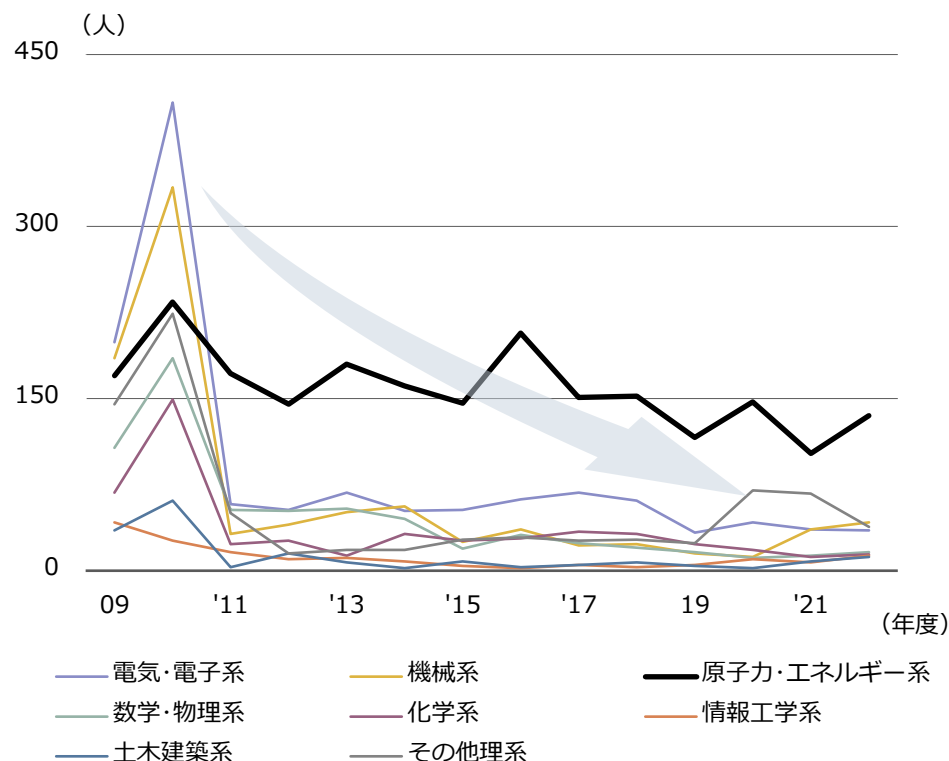
- メーカーにおいては、原子力関連業務に従事する従業員数は震災以降減少傾向。特に、大型設備の製造時に必要な溶接工・組立工・機械工などの高い技術を持つ技能職が大きく減少。
- 原子力関連企業の就職説明会に参加する原子力系の学生はほぼ横ばいであるが、将来の原子力産業の見通しが見えない中で、非原子力系の学生の参加は大きく減少。

主要メーカーの原子力従事者



(出所) 日本電機工業会資料

原子力関連企業/合同就職説明会の学生参加者



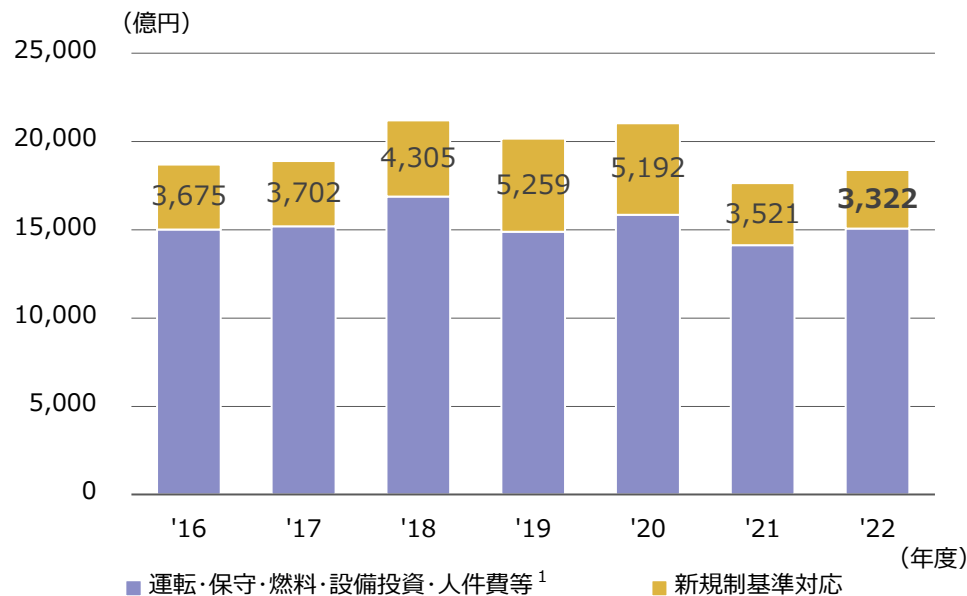
(出所) 日本原子力産業協会資料

国内サプライチェーンの現状（事業の継続性）

- 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等の撤退が相次いでおり、サプライチェーンの劣化が懸念される。
- 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・人材の維持は極めて重要な課題。

電気事業者における原子力関係支出高

- 直近年度の新規制基準対応に関する支出額：3,322億円、原子力関係支出高における全体の約2割を占める
⇒ **安全対策工事で事業維持も、将来の事業見通し立たず**



(出所) 日本原子力産業協会資料
(注) 1. 除く新規制基準対応分

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）
- 甲府明電舎（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**

(出所) 各種資料より資源エネルギー庁作成

【参考】建設の空白による原子力サプライチェーンの喪失による影響の例

- 米国や仏国では、長期間に亘って原子力発電所の建設がなかったことで、原子力サプライチェーンが弱体化。近年の案件では、建設遅延やコスト増加に直面。



米国

- スリーマイル原子力発電所の事故以降、新設案件がなく、ボーグル原発3・4号機は、35年ぶりの新設原発として、2013年に建設開始。
- 長期間建設がない間、米国では原子力に関与する事業者が減少し、主要資機材を日韓等の海外から輸入。
例) 圧力容器（韓斗山重工業）、格納容器（IHI）、タービン（東芝ESS）
 - ✓ 米国機械学会が認証する原子力規格（N-Stamp）取得企業が、600社から200社以下（1980⇒2007年）に減少。
 - ✓ 米国エネルギー省は、2005年、米企業には第三世代原子炉の主要資機材（原子炉圧力容器、蒸気発生器等）を製造する能力はないと評価。
 - ✓ 2002年以降、原子炉圧力容器上蓋（取替用）は全て海外に依存。
- 建設ノウハウの喪失や同時多発テロを受けた規制強化等の影響で、工期:8年、建設費:約190億ドル以上増加。

炉型	PWR (WEC AP1000)
出力	110万kW×2基



（出所）三菱総合研究所「令和元年度原子力の利用状況等に関する調査（国内外の原子力産業に関する調査）」、各種資料等の公開情報



仏国

- フラマンビル原発3号機は、1993年着工のシボー2号機以来14年ぶりの新設原発として、2007年に建設開始。
- 仏電力会社EDFより仏フラマトム社が一括受注し、新型炉EPRの仏国内初の建設。
- 殆どの資機材を仏国内のサプライチェーン（フラマトム、アルストム等）で賄うも、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、工期:16年以上、建設費:約100億ユーロ増加。
 - ✓ 仏規制庁長官が「新設にかかる原子力産業界の能力に対する疑念が生じている」とし、仏政府は元PSAフォルトツ氏に分析を依頼。
 - ✓ フォルトツ報告書では、「新規着工のない15年の間にEDFのPJマネジメント能力や部品メーカーの製造能力が低下、特に溶接の技術や人材を喪失した」と指摘。（2019年10月）

溶接不良が発覚した箇所
(青丸部分)



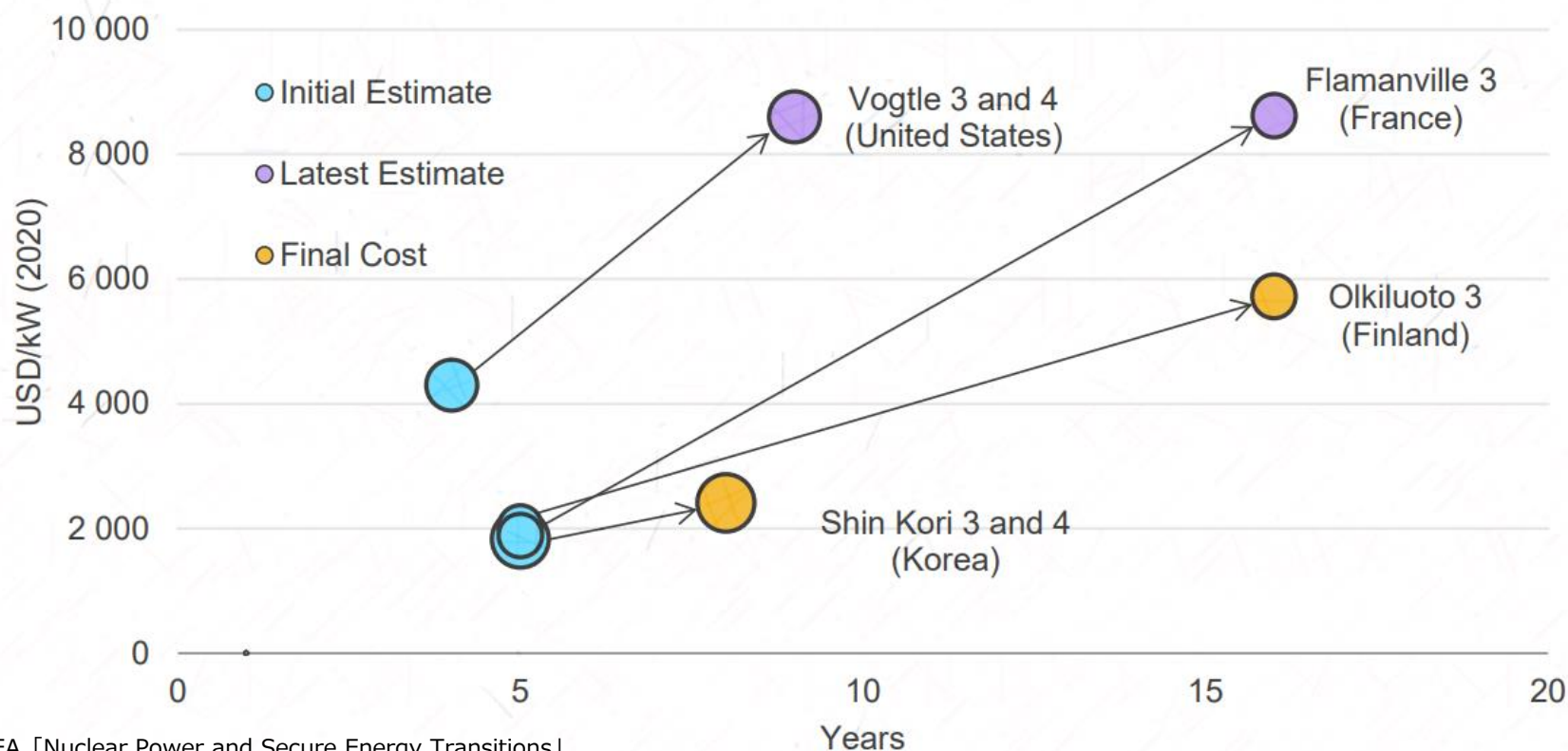
炉型	PWR (フラマトム EPR)
出力	163万kW

（出所）三菱総合研究所「令和元年度原子力の利用状況等に関する調査（国内外の原子力産業に関する調査）」、ASN HP、各種資料等の公表情報

【参考】海外の原子力発電所の建設プロジェクトにおけるコスト動向

- 国際エネルギー機関（IEA）の報告書では、米国（ボーグル3・4号機）及び欧州（フラマンビル3号機、オルキルト3号機）における建設プロジェクトの計画遅延やコスト増加の原因として、建設工事の規模の大きさ・複雑さ、サプライチェーンの欠乏等が指摘されている。
- 同報告書によれば、建設コスト削減のための対策として、建設工程のモジュール化・標準化技術や、同炉型の発電所を複数建設することが挙げられている。

Overnight cost and construction times for selected recent nuclear projects



(出所) IEA 「Nuclear Power and Secure Energy Transitions」

次世代革新炉の建設に向けた課題

- 国内原子力産業は、震災以降も、新規制基準対応、研究開発、海外機器輸出等を組み合わせ、プラント建設に必要な工程（設計、機器製作、現場工事等）を経験し、技術継承が図られてきた。
- 他方、国内建設を通じてのみ、設計・製作の機会が得られる機器等も存在するため、プロジェクト不在の状況が継続することで、技術継承が困難となる懸念も。
- また、仮に、新設計画が開始しても、サプライヤが製品の調達・ものづくり等の事業機会に至るまでには相当程度の期間を要するため、空白期間における支援が必要。

分野毎の技術継承の機会例

○：継承可 △：一部の技術のみ継承可

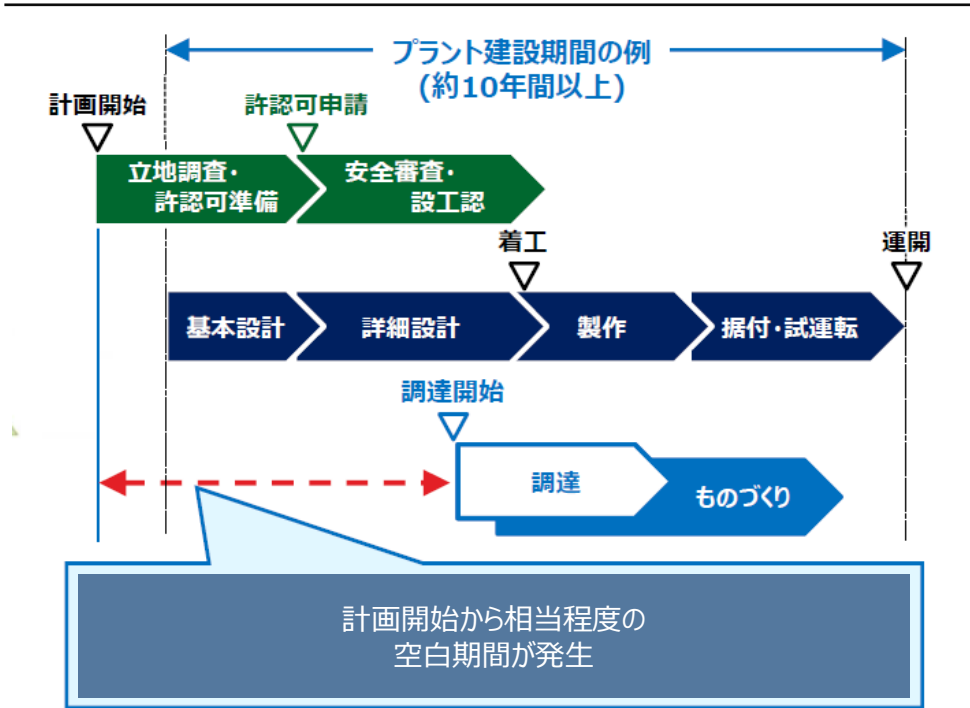
← プラント建設に必要な工程 →

	設計		製作		現場工事	
	基本設計	機器設計	主機	補機	据付	管理
国内建設	○	○	○	○	○	○
新規制基準対応	○	△	-	△	○	○
修理取替	○	△	△	△	△	△
R&D	○	△	△	△	-	-
機器輸出	△	△	△	△	△	△

↑ 技術継承の機会 ↓

(出所) プラントメーカーヒアリング

原子力プラントの建設工程例

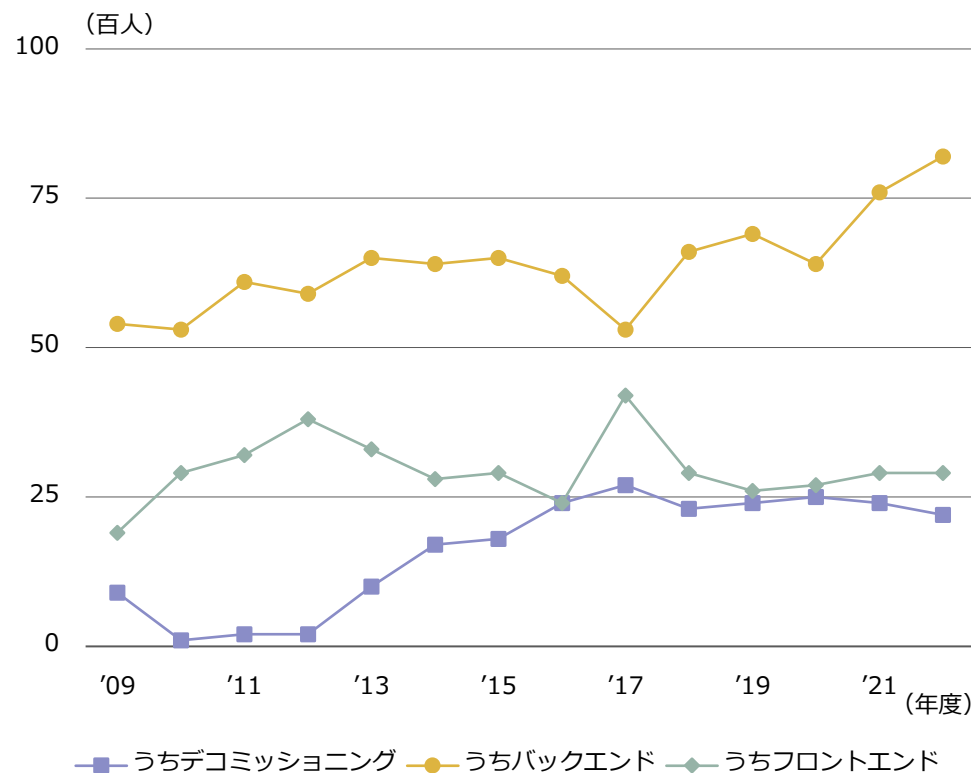
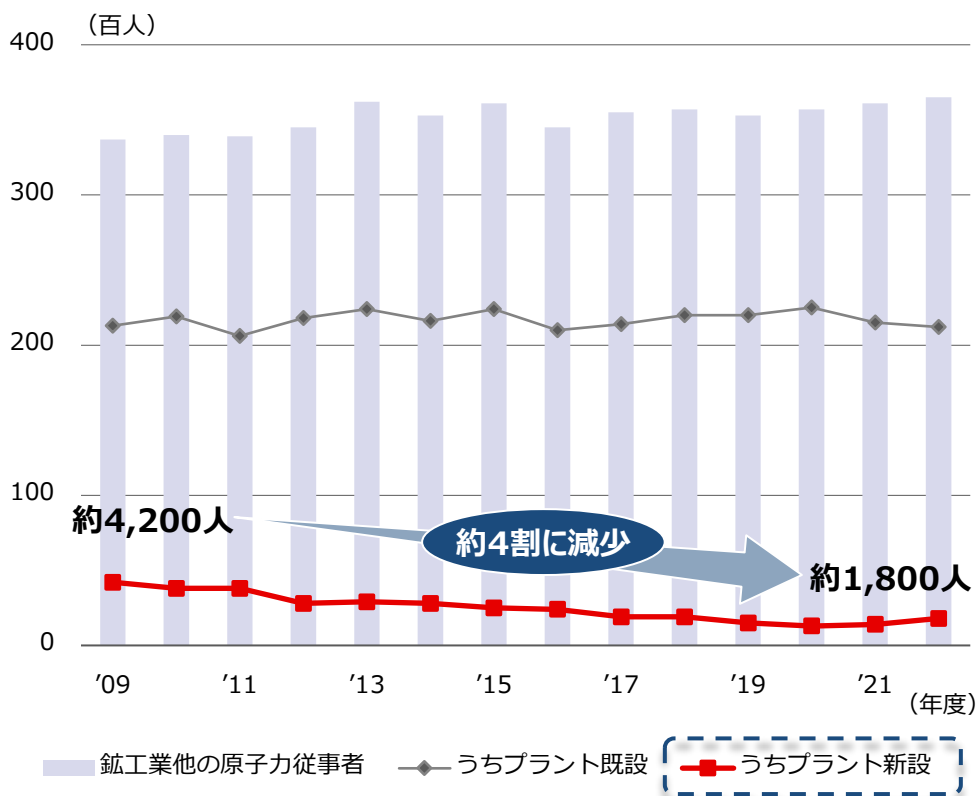


(出所) プラントメーカーヒアリング

【参考】次世代革新炉の建設に向けた課題（関連人材）

- 新規制基準への対応等を通じて、既設プラントやバックエンド等の原子力従事者数は横ばい傾向。
- 一方、プラント新設プロジェクトの停滞に伴い、事業者内の配置転換が進んだ結果、**プラント新設に関連する人材は、震災前の約4割にまで減少。**

鈷工業他における産業構造区分別の原子力関係従事者（棒グラフ:総数/折れ線:内訳）



(出所) 日本原子力産業協会資料

【参考】原子力サプライチェーンを保持する意義

- 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。
- 原子力サプライチェーンを国内に保有する意義として、発電所の安定的な利用に加えて、生産設備・製造技術の蓄積による他産業への波及・発展等が挙げられる。

原子力発電所の国産化率の推移

	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号 (BWR)	柏崎刈羽 7号 (ABWR)
運転 開始年	1966	1970	1975	1981	1990	1997
国産化率 (%)	35%	58%	90%	99%	99%	89%

(出所) RIETI「原子力発電の効率化と産業政策-国産化と改良標準化-」、電力会社HP

原子力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

- 原子力産業は年間約2兆円の市場と8万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他産業の発展

- 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

(出所) 各種資料より資源エネルギー庁作成

【参考】原子力産業による国内経済・雇用等への裨益

- 原子力は、経済活動に不可欠であるエネルギーの安定供給性に優れている。加えて、運転を担う電力会社、定検工事・保守の工事会社のほか、プラントメーカーやサプライヤといったものづくり分野等、多岐に亘る領域で雇用効果がある。
- 原子力産業は、サプライチェーン（約1,000万点の部品点数）を国内に持ち、国内の発電所の安定利用や経済・雇用等にも貢献してきた。

原子力産業の特徴（一部再掲）

①エネルギーとしての安定供給性

- 気象条件や時間帯等による発電電力量への影響が小さい
- 燃料は海外からの輸入に頼るものの、数年に亘って保存可能で燃料投入量に対するエネルギー出力が大きい。ため、化石燃料比で必要な燃料量が少なく、地政学リスクも小さい

②国内雇用への裨益

- 運転を担う電力会社、定検工事・保守の工事会社のほか、プラントメーカーやサプライヤ等、多岐に亘る領域で約8万人規模の雇用効果
- 特に工事会社は各立地毎に存在しており、約3万人もの従事者

③裾野の広いサプライチェーン

- 原子力発電所の部品点数は、約1,000万点。風力（数万点）等と比べ、関連企業が広範であり、多くの雇用と経済効果を創出

（出所）内閣府原子力委員会「原子力白書」、電気事業連合会資料等

領域別における雇用状況

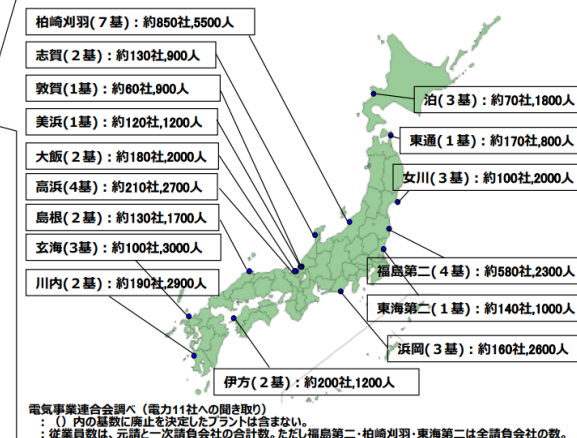
【原子力産業界の全体構造】 （合計約80,000名以上）

【運転・保守】 電力 原子力部門 （約13,000名※ ¹ ）	
【設計・設備工事】 プラントメーカ （約7,400名※ ¹ ）	【定検工事・保守】 工事会社 （約33,000名※ ² ）
【技術・材料、燃料等の供給】 原子力関連部品・燃料成型加工メーカ （約27,000名以上※ ³ ）	

※¹ 「原子力発電に係る産業動向調査2017報告書」
一般社団法人日本原子力産業協会
※² 電気事業連合会調べ（一部プラントメーカとの重複あり）
※³ ※¹データより算出

<各発電所の工事会社数、従業員数>

- ・工事会社は発電所のある各地域毎に存在
- ・安全確保のためには、熟練作業員の散逸を防ぐことが不可欠



（出所）電気事業連合会資料

【参考】英国における産業競争力強化・経済成長及び排出削減例

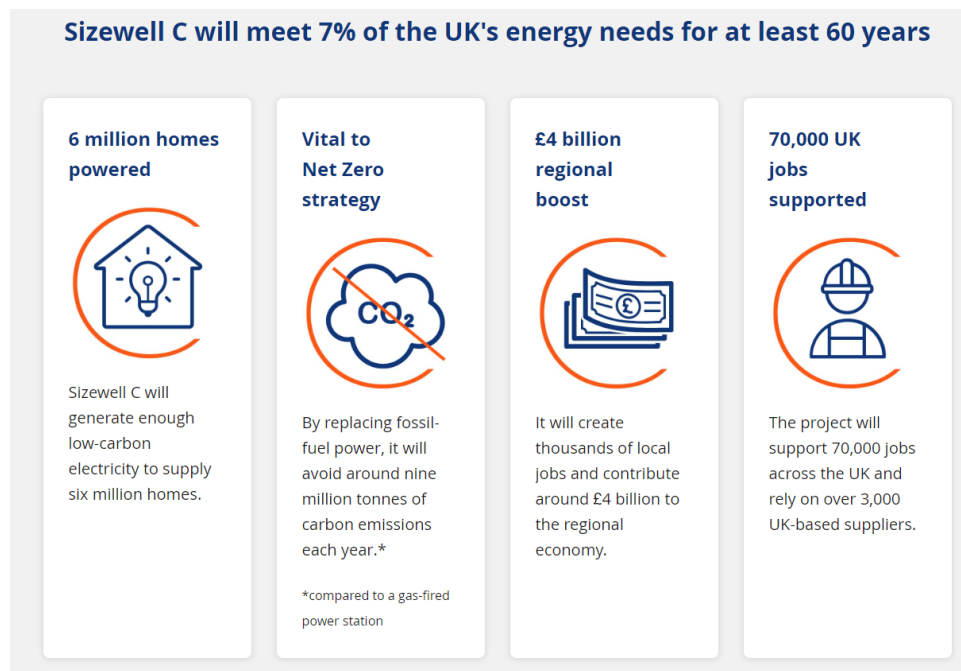
- EDFの開示情報によると、Hinkley Point C 発電所では、建設プロジェクトを通じて、22,000人の雇用を創出しているほか、年間900万トンのCO2排出削減を見込む。教育・技能訓練にも、24百万 £ の投資実績有り。
- 同様に、Sizewell C 発電所の建設PJでは、立地地域における数千人の雇用・40億 £ の市場創出に貢献する見込み。年間900万トンのCO2排出削減に加えて、英国全土でも70,000人の雇用及び3,000社超のサプライヤの参画が期待されている。

Hinkley Point C 発電所の建設効果



(出所) EDF Energy HP

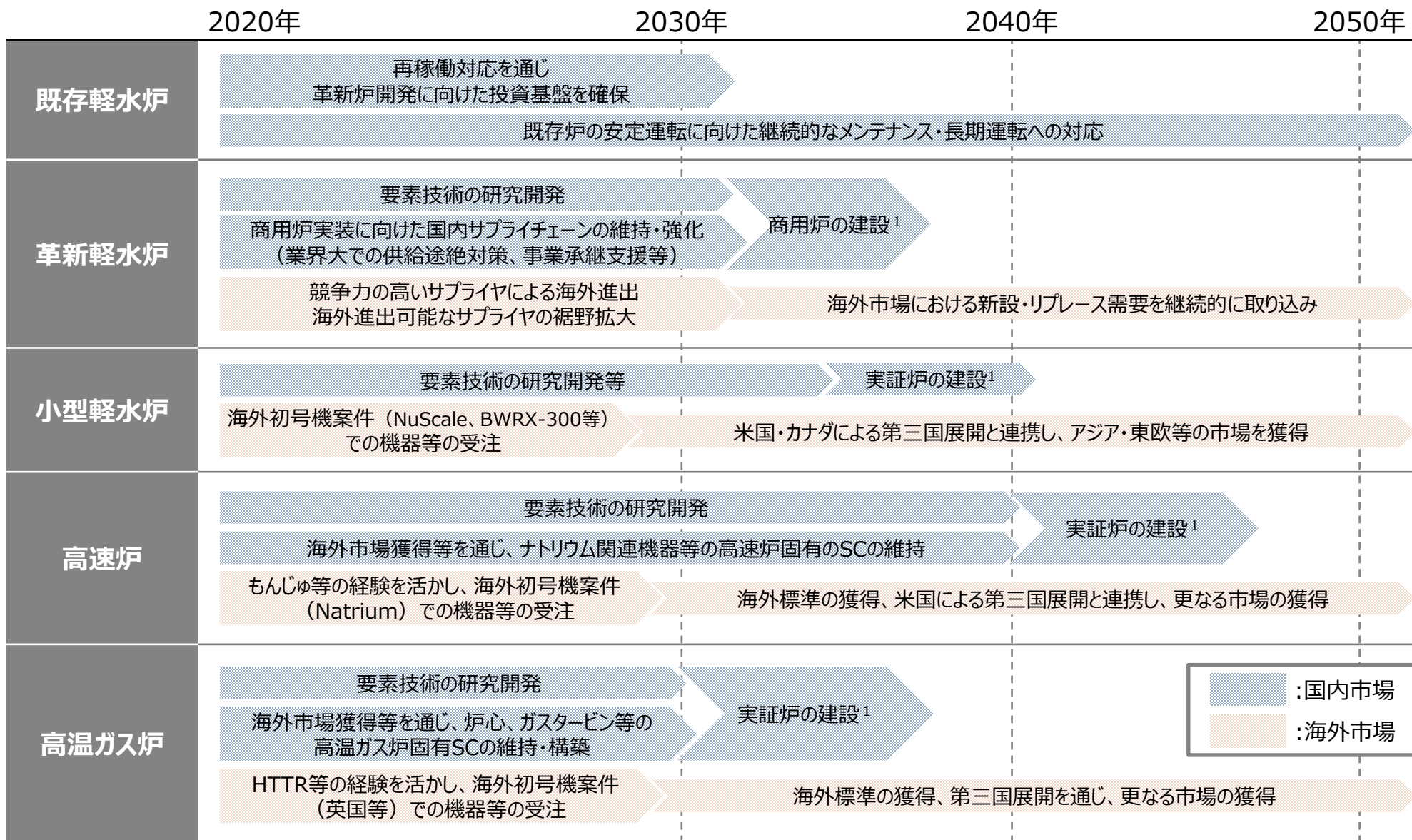
Sizewell C 発電所の建設効果



(出所) EDF Energy HP

【参考】原子力サプライチェーンによる市場獲得戦略

第6回革新炉WG
(令和4年11月2日) 資料3 一部加工



(出所) 各種資料より資源エネルギー庁作成

(注) 1. 実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。