

高速炉開発の進め方について

2018.11.2

三菱重工業株式会社

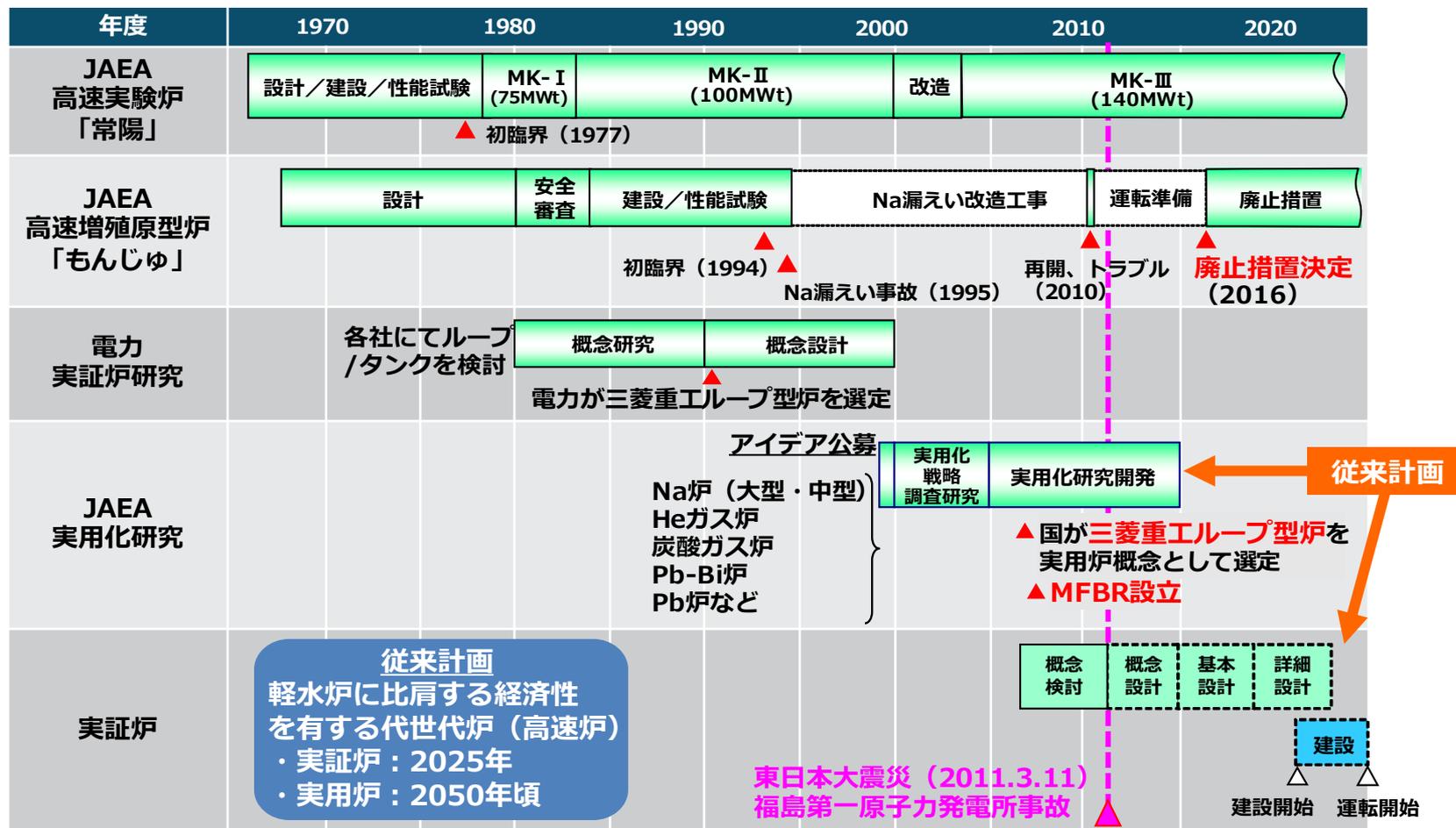
- (1) 高速炉の意義・必要性
- (2) これまでの日本の高速炉開発
- (3) ナトリウム冷却高速炉について
- (4) 三菱重工の高速炉開発への取り組み
- (5) ASTRID協力について
- (6) 実用化に向けて
- (7) 今後の進め方
- (8) まとめ

(1)高速炉の意義・必要性

- 「高速炉開発の方針」にも記載されている通り、我が国は資源の有効利用等の観点から、「高速炉開発の推進を含めた核燃料サイクルの推進」を基本方針としており、昭和31年の原子力開発利用長期計画*(原子力委員会) 当時から、増殖炉の開発を目標としてきた。
*：わが国における将来の原子力の研究、開発および利用については、主として**原子燃料資源の有効利用**の面から見て**増殖型動力炉がわが国の国情に最も適合する**と考えられるので、その国産に目標を置くものとする。
- エネルギー基本計画において、高速炉は放射性廃棄物の減容化や有害度低減のための技術の一つとされている。
(高速炉を導入することでアクチノイドの有効利用が可能となり、さらなる廃棄物の減容化や有害度低減が可能となる。：2018年8月10日第12回高速炉開発戦略WG 長岡技術科学大学鈴木教授)
- 利用目的の無いプルトニウムを持たないとの原則を堅持し推進されるプルサーマルに対し、軽水炉だけのマルチリサイクルは困難**。回せる回数(回数は検討が必要)。(同上鈴木教授)
**：軽水炉によるマルチリサイクル
✓ プルサーマルで燃やした**使用済MOX燃料は燃えないPuの割合が増加し軽水炉で燃やしにくい**。
⇒プルトニウムの品質の低下(高次化プルトニウム)
✓ **高速炉では使用済MOX燃料中のPuも燃やすことが可能**で、燃えないPuの割合を低減可能。
⇒**プルサーマルを繰り返すことに寄与**。

上記が高速炉の意義と認識しており、エネルギーの自立、資源有効利用、プルサーマル使用済み燃料への対応等、必要とされる国、社会のニーズに対応できるよう、メーカーとして技術・人材の両面で高速炉開発に貢献。

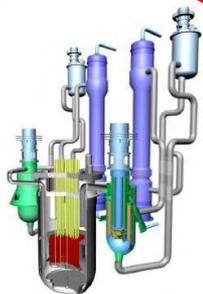
(2)これまでの日本の高速炉開発—開発工程



出典：三菱重工技報 VOL.43 No.4：2006 p.142

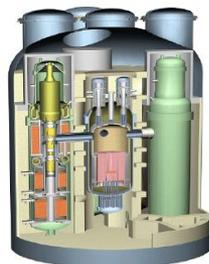
- 日本は1960年代から高速炉開発に取り組み。当社は1970年代より開発に参画。
- 実用化戦略調査研究において弊社提案のナトリウム冷却炉が実用化概念として選定。
- 2007年に弊社は高速炉開発のエンジニアリング会社 (MFBR)を設立。

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（FS）にて、種々の概念を構築



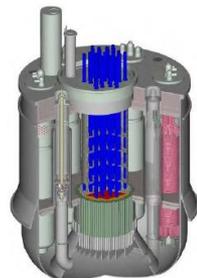
ナトリウム冷却炉

- 150万kWe大型炉（酸化物及び金属）
- 革新技術の採用で物量、建屋容積を大幅に削減
- ナトリウムの特徴を考慮した設計により信頼性を確保



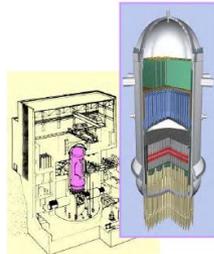
ヘリウムガス冷却炉

- 150万kWe大型炉（窒化物被覆粒子燃料）
- 高温熱源の特長を活かして物量・建屋容積を削減
- 減圧事故、炉心損傷事故対策を考慮



鉛ビスマス冷却炉

- 75万kWe中型炉（窒化物燃料）
- 化学的に不活性な冷却材であり二次冷却系を削除したシステムを構築



水冷却炉

- 135万kWe BWR型高速増殖炉（酸化物燃料）
- 増殖性確保のため、高富化度・高稠密炉心概念
- ABWRのプラント技術が利用可能

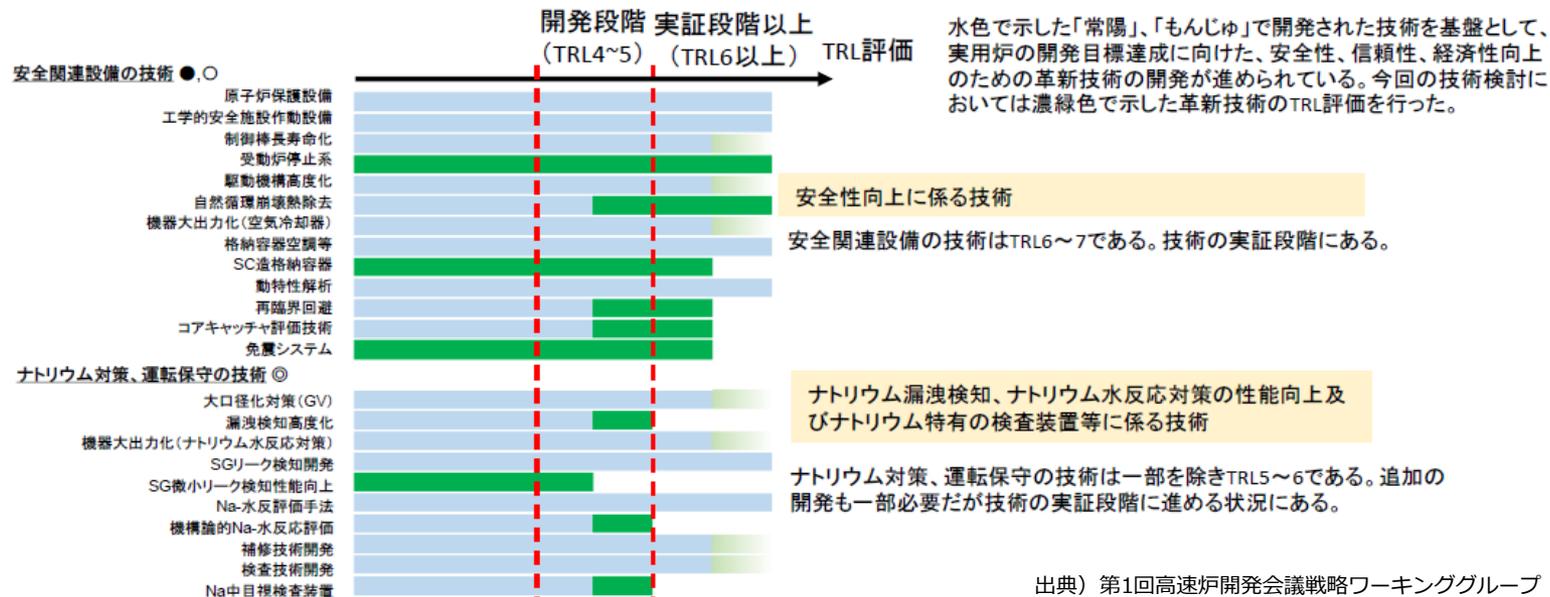
- 1999年のFSから、弊社はナトリウム冷却炉に加え、鉛ビスマス炉、Heガス冷却炉等についても検討を実施。
- 設計要求への適合性、技術的実現性、国際的視点から各種炉型の比較検討が実施された。
- 上記検討結果を受けて、**Na冷却炉が主概念として選定された。**
(文部科学省「高速増殖炉サイクルの研究開発方針について」（2006年11月））

| 項目 | ナトリウム冷却炉 | ヘリウムガス冷却炉 | 鉛ビスマス冷却炉 | 水冷却炉 |
|-----------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 設計要求への適合性 | ◎：全て適合 | ◎：全て適合 高温熱源としても有効 | ◎：全て適合 | ○： <u>資源有効利用性、環境負荷低減性に劣る</u> |
| 技術的実現性 | 高い確度で実現性を見通すことが可能 | 概念成立性に係わる課題を解決することが必要 | 概念成立性に係わる課題を解決することが必要 | 実現性を見通すための課題が炉心燃料関連に限定 |
| (国際的視点) | 国際協力を期待することが可能 | 国際協力を期待することが可能 | 国際協力を期待することが困難 | 国際協力を期待することが困難 |

出典) METI/MEXT FaCT評価委員会第3回資料4-1、2011年1月18日

第10回高速炉開発戦略WG (2018.6.1) 資料4 抜粋

高速炉技術の技術成熟度(TRL)評価結果



- 炉システムの実用化に必要な技術課題の多くは、TRL5以上であり、実機設計に適用可能なTRL7の技術も複数保有することから、**技術の実証段階にあるか、技術の実証段階に進める状況にある。**
- 第4世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF)における開発時間の評価においても、ナトリウム冷却炉 (SFR)の実証段階は他の炉型に比べ早いと評価されており、また安全設計に関する指針の整備もSFR向けが先行している。(日本が主導)
- メーカーとして、これまで蓄積してきた技術の観点から、ナトリウム冷却炉の技術成熟度が最も高く、実現性が一番高い炉であると考える。

(3)ナトリウム冷却高速炉についてー諸外国の動向

IAEA ロシアのナトリウム冷却高速炉開発の歴史

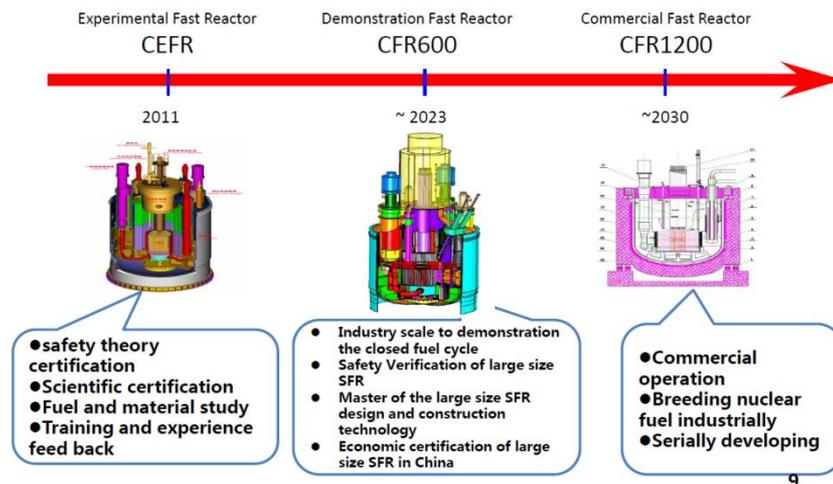


| | BR-5/10 | BOR-60 | BN-350 | BN-600 | BN-800 | BN-1200 |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|
| 型式 | ループ | ループ | ループ | タンク | タンク | タンク |
| 燃料 | PuO ₂ /UPuO ₂ | UO ₂ /UPuO ₂ | UO ₂ | UO ₂ | UPuO ₂ | UPuO ₂ /UPuN |
| 増殖比 | - | - | 0.93 | 0.85 | 1.0 | 1.2-1.4 |
| 定格熱出力 (万kWt) | 0.59/0.8 | 最大6* | 75* | 147* | 210 | 280 |
| 電気出力 (グロス) (万kWe) | - | 1.2 | 最大15 | 60 | 88 | 122 |
| 1次冷却材 出入口温度 (°C) | 500 430 | 最大530 310-340 | 440 280 | 550 377 | 547 354 | 550 410 |
| 3次系パラメータ ・蒸気温度 (°C) ・蒸気圧 (MPa) ・給水温度 (°C) | - | 480 | 410 4.9 160 | 505 14 240 | 490 14 210 | 510 17 275 |
| 備考 | 廃止措置準備中 | * 発電と地域への熱供給 | 現在はカザフスタン、廃止措置中 * 発電と海水脱塩 | * 発電と地域への熱供給 | | |

出典) 第5回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料1 (2017.10.31)

中国原子能科学研究院 中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

Fast Reactor Development Strategy

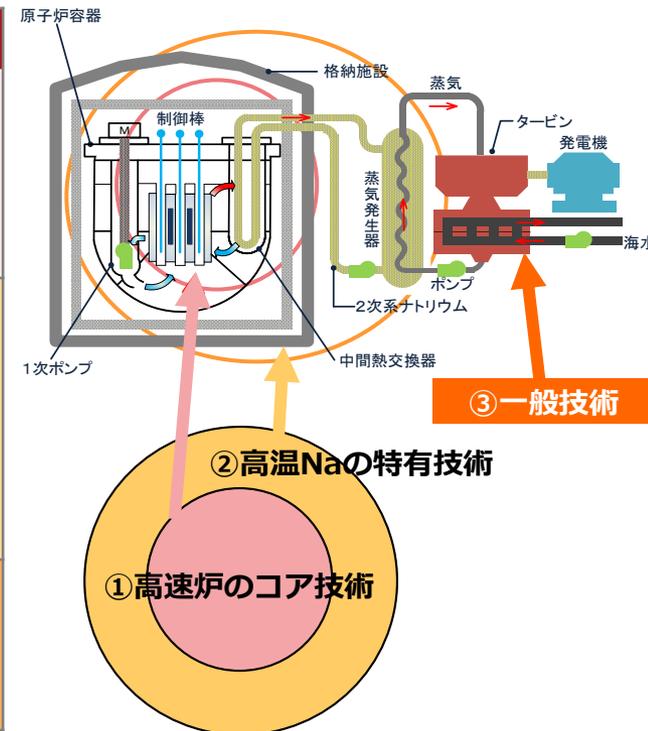


出典) 第4回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料2 (2017.9.14)

これまでの高速炉開発戦略WGでも紹介された通り、原子力を重要なエネルギー源と位置づけ、核燃料サイクルを推進する国々は、ナトリウム冷却炉を主に高速炉開発を進めている。

技術の分類

| 分類 | 内容 | 必要な技術分野 (例) |
|------------|------------------|--|
| ①高速炉のコア技術 | 許認可を取得するために必要な技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・プラントエンジニアリング ・炉心・燃料設計技術 ・遮へい設計技術 ・安全設計技術 ・プラント動特性評価技術 |
| ②高温Naの特有技術 | 軽水炉・火力等に対応できない技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウムの取扱技術 ・高温薄肉機器の強度評価 (耐熱、耐震) ・ナトリウム炉特有の機器 <ul style="list-style-type: none"> -Na熱交換器 -Naポンプ -Na用計器 |
| ③一般技術 | 軽水炉・火力等に対応可能な技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・伝熱流動解析技術 (ナトリウム関係を除く) ・構造評価技術 (高温を除く) ・製造技術 |



高速炉の特徴

高速中性子

ナトリウム冷却材

高温・低圧

- 高速炉の技術は、①高速炉のコア技術、②高温Naの特有技術、③一般技術に分類され、高速炉特有の①、②の維持、更なる向上が必要。
我が国は常陽、もんじゅの実機建設を通じて①高速炉のコア技術を確立。
- 弊社は、これまでの高速炉開発への参画を通じてコア技術の大半を保有。
- 国際協力も活用し、効率的な高速炉開発推進を図っていく。

②高温Naの特有技術

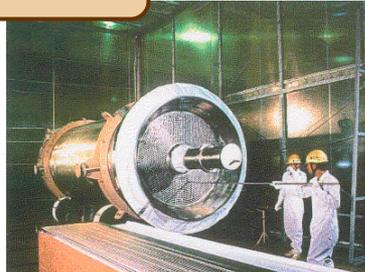
- ・ 熱流動解析技術
- ・ 高温構造設計技術
- ・ 大型機器の設計、製作技術
- ・ Na取扱技術
- ・ 高速炉基準・材料開発
- ・ 薄肉耐震振動評価技術
- ・ 高速炉計測制御技術
- ・ Na設備の保守・補修技術

など

常陽



回転プラグ



中間熱交換器

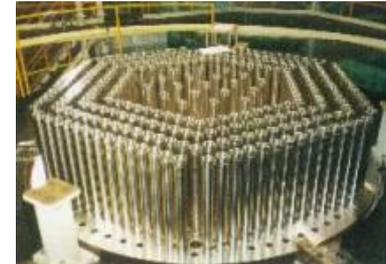


炉心上部機構



原子炉容器

もんじゅ



炉内構造物



蒸発器

出典：日本計画研究所特別研究セミナー「三菱（MHI/MFBR）におけるFBR開発の取り組みと今後の展開」（2007.9.27）

常陽、もんじゅへの参画を通じて高速炉開発に必要な②高温Naの特有技術も蓄積。

- ・ 高温構造設計技術
- ・ 大型・主要機器（薄肉）の設計、製造技術など

(4)三菱重工の高速炉開発への取り組みー常陽、もんじゅでの分担 三菱重工

| 設 備 | 項 目 | | 設 備 | 項 目 | |
|------------------|---------|---------|---------|----------|---------|
| プラント エンジニアリング | 炉心設計 | 常陽、もんじゅ | 2次冷却系 | 2次冷却配管 | 常陽 |
| | 安全設計 | 常陽、もんじゅ | | 蒸気発生器 | もんじゅ |
| | 動特性解析評価 | 常陽、もんじゅ | | 2次ポンプ | 常陽 |
| 原子炉構造 | 原子炉容器 | もんじゅ | 崩壊熱除去系 | | 常陽 |
| | ガードベッセル | もんじゅ | 計測制御設備 | プラント制御装置 | もんじゅ |
| | 炉内構造物 | もんじゅ | | 安全保護系 | もんじゅ |
| | 炉心構成要素 | もんじゅ | | 中性子計装 | もんじゅ |
| | 制御棒駆動装置 | もんじゅ | 電気設備 | 電源設備 | 常陽、もんじゅ |
| | 回転プラグ | 常陽 | | 無停電源 | もんじゅ |
| | 炉心上部機構 | 常陽 | 原子炉格納施設 | | もんじゅ |
| 1次冷却系 | 1次冷却配管 | もんじゅ | その他BOP | 換気空調設備 | もんじゅ |
| | 中間熱交換器 | 常陽 | | 補助蒸気設備 | もんじゅ |

出典：日本計画研究所特別研究セミナー「三菱（MHI/MFBR）におけるFBR開発の取り組みと今後の展開」（2007.9.27）

弊社は「常陽」、「もんじゅ」を通して、**高速炉プラントのほぼすべての機器の設計・製作、建設を経験し、実証炉建設に向けて技術を蓄積。**

| 多目的ナトリウム試験装置 (MTL-3) | ナトリウム熱流動試験装置 (SGTF) |
|---|---|
|  <p>仕様</p> <ul style="list-style-type: none">試験ポット：Φ0.7m×h1.5mNa最高温度：550℃ <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none">種々の目的に対応可能 |  <p>仕様</p> <ul style="list-style-type: none">試験ポット：Φ2.0m×h5.0mNa最高温度：600℃ <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none">大規模・大容量熱流動試験装置国内メーカ最大規模 |
| ナトリウム熱過渡試験装置 (SASS) | 大型3次元振動台 |
|  <p>仕様</p> <ul style="list-style-type: none">試験ポット：Φ0.3m×h2.5mNa最高温度：750℃ <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none">高温Na高速注入 |  <p>仕様</p> <ul style="list-style-type: none">振動台サイズ：6m×6m最大搭載量：100ton <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none">世界クラス規模 |

出典) FR17 JAEA-Mitsubishi Exhibition Panel 「FBR test facilities in Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.」 (2017.6.26-30)

- 弊社は、化学的に活性で不透明なナトリウムに係る技術を開発・習得するため、**高速炉開発の初期から、ナトリウム設備を保有し、開発に資するデータを蓄積。**
- 現在、**3つのナトリウム試験ループ**を有し、高速炉開発に活用。
- また、軽水炉向けの試験設備（3次元振動台など）も活用。

(4)三菱重工の高速炉開発への取り組み－保有する試験施設

| | | 70年代 | 80年代 | 90年代 | 2000年代 | |
|-----------------|--|---|----------------------------------|--|---|--|
| FBR開発の歴史 | | ナトリウム技術の創世 もんじゅ機器の研究開発 ☆常陽臨界 (1977) 常陽開発 | 実証炉概念設計 システム化炉型評価研究 もんじゅ開発 | 実証炉最適化研究 FBR実用化戦略 フェーズⅠ FBR実用化戦略 フェーズⅡ ☆もんじゅNa漏洩事故 ☆もんじゅ臨界 (1994) トップ・エントリーシステム開発 | 実証炉概念設計・技術開発 ☆MFBR設立 実証炉開発 | |
| Na棟の活動概要 | | (多目的試験装置は、設備の改造、撤去、新設を行い現在に至る) | | | | |
| 多目的試験装置 (MTL-3) | 基礎研究 (Na精製・洗浄・除去) 常陽熱交換器性能試験 設計基準用Na中材料試験 Na大規模漏洩・火災試験 熱成層試験 | Na漏洩・燃焼・消火試験 | 耐Naコンクリートライナー試験 回転プラグ機構試験 | Na燃焼試験 実用炉高温材料試験 Na微小漏洩試験 | Na中補修技術開発 ・伝熱管摩耗試験 ・異材強度試験 ・機構部動作確認試験他予定 | |
| 熱流動試験装置 (SGTF) | | | 蒸気発生器・炉壁冷却試験 | Na中検査装置搬送試験 回転プラグシール確証試験 配管エロージョン試験他予定 | | |
| 熱過渡試験装置 (SASS) | | | 安全系SASS (自己制御棒駆動機構) 検証試験 | 燃料集集体乾式洗浄技術開発 | | |

出典) JAEA Research 2006-042、平成24年 文部科学省 原子力システム研究開発事業「液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修装置の開発」成果報告書

保有するナトリウム試験ループを用い、過去40年以上、電共研、JAEA殿委託試験など、種々のR&Dを実施。各種の知見を得るとともにナトリウム取扱い技術も蓄積。

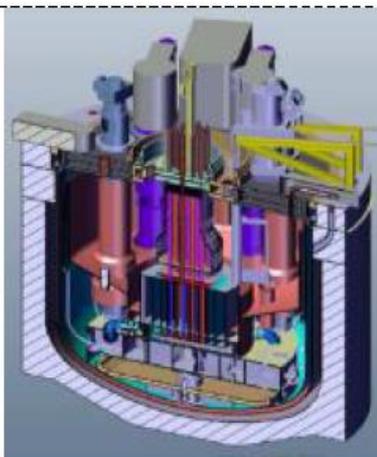
- 2014年より弊社は日本側実施機関としてJAEA殿のもとASTRID協力に参画。
 - ・ 2014年5月：国際協力の取決めに日仏政府が署名
 - ・ 2014年8月：実施機関間協定を締結（仏国次世代炉計画及びナトリウム高速炉の協力に関する実施取決めに関し、JAEA、MHI、MFBRと仏国原子力・代替エネルギー庁、AREVA NP(現framatome)が締結)
- **ASTRID協力も活用し、高速炉技術の維持、向上を行ってきた。**

【ASTRIDの仕様】

- 電気出力：60万kW
- タンク型ナトリウム冷却高速炉

【主な特徴】

- 長寿命核種の核変換が可能な炉心
- シビアアクシデント対応
- 多様化された炉心冷却系
- 発電系にガスタービンの採用を検討



【日本の分担】

- ・ 研究開発
燃料、シビアアクシデント、原子炉技術に関する試験・解析等
- ・ 設計
崩壊熱除去系、炉停止系、免震システム、プラント熱流動、原子炉容器、コアキャッチャー等

【スケジュール】

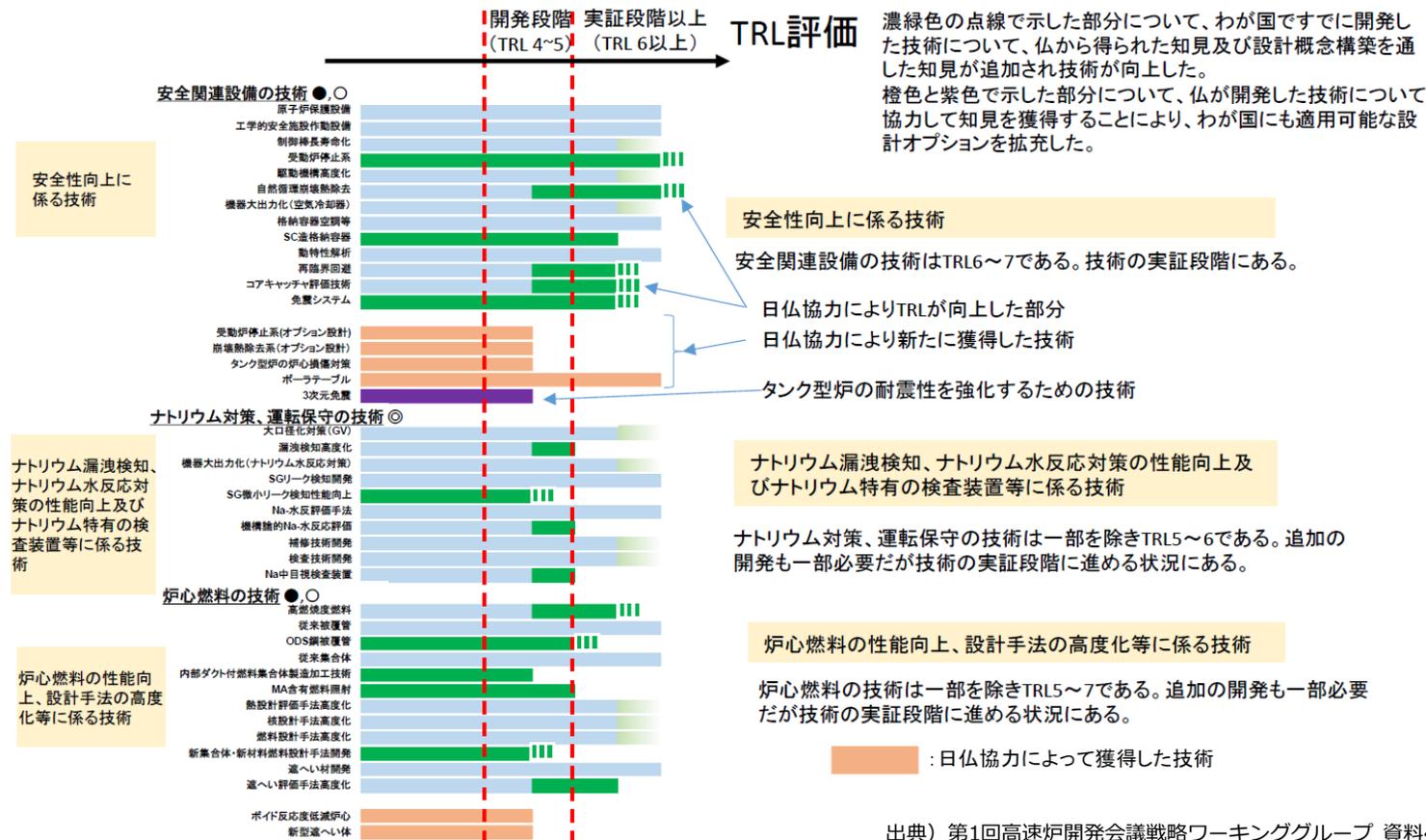


*) Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration

出典) 第1回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料3 (2017.3.30), MHI press release(2014.8.7)

第10回高速炉開発戦略WG (2018.6.1) 資料4 抜粋

高速炉技術のASTRID協力の成果による技術の拡充

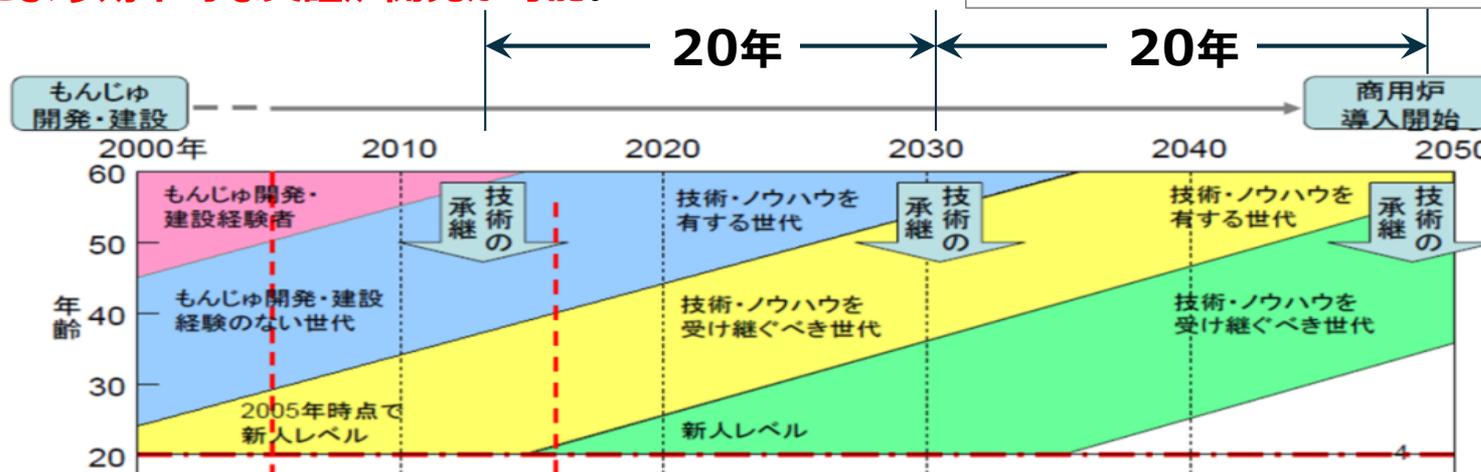
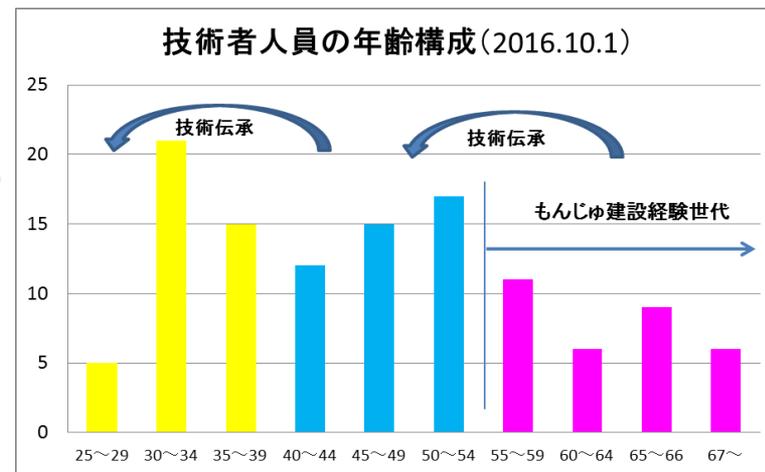


出典) 第1回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料4 (2017.6.1)

ASTRID協力により、タンク型炉に関する知見も獲得。効率的に技術の拡充が図れたと共に、国内高速炉開発に有効に活用可能。

(6)実用化に向けて一技術維持・向上の課題

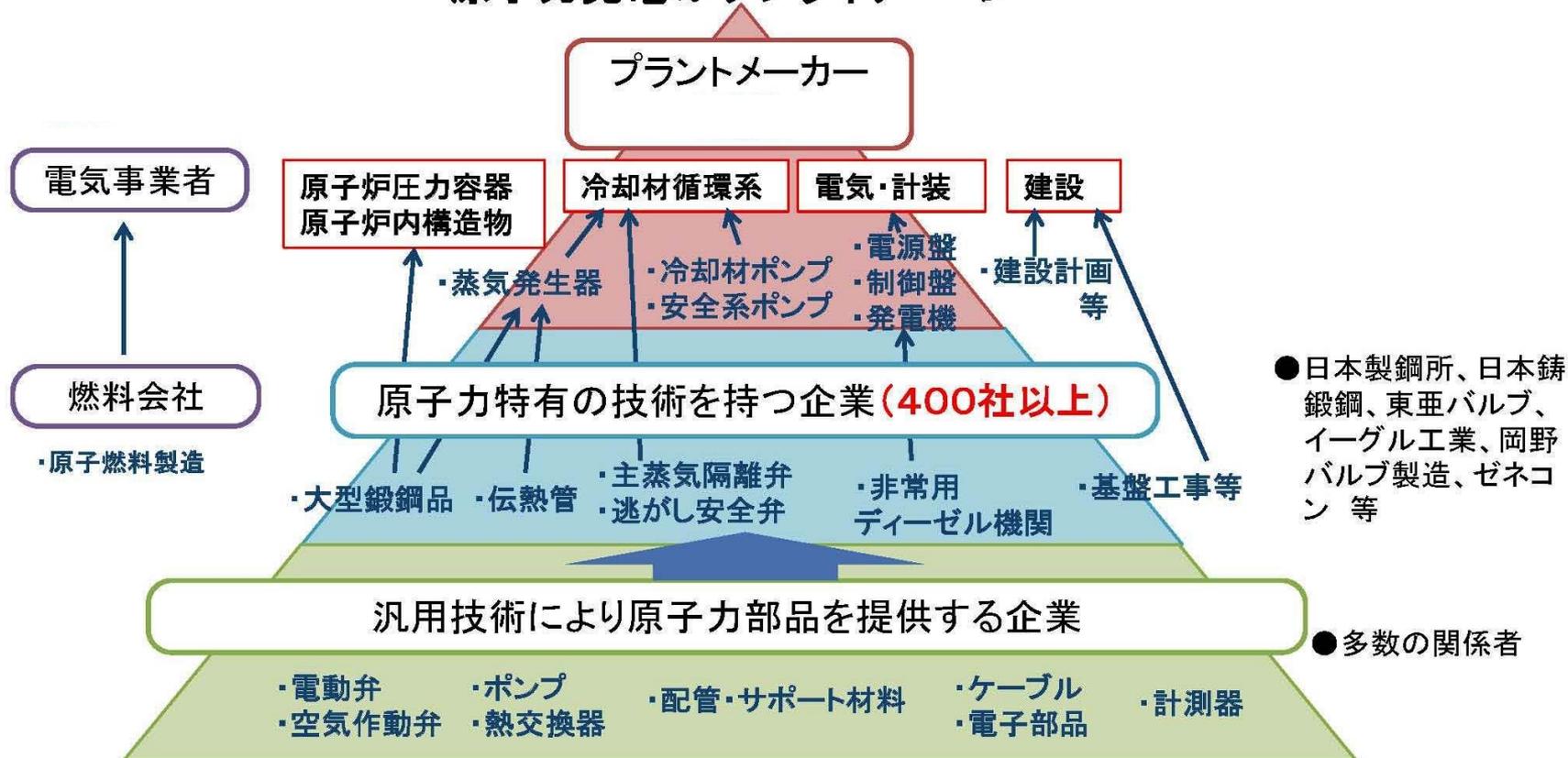
- もんじゅの建設開始（1985年）から30年以上（初臨界から20年以上）高速炉プラントの建設が途絶。
- 技術の伝承維持には20年毎のプラント建設が望ましい。**
- もんじゅの建設以降は実証炉設計、実用化戦略調査研究等の机上検討が主。
ここ数年はASTRID協力での分担設計を実施。
- 技術維持・向上のためには**プラント一式の設計・製作・建設・運転の経験が不可欠**
- もんじゅ経験世代が残る**今後5年でのプラント一式の設計により効率的な実証炉開発が可能。**



出典:核燃料サイクル技術・人材の現状と課題(H17.12資源エネルギー庁)

技術の維持・向上のため今後5年でプラント一式の設計を行なうことを希望。
(ASTRID協力や国内へのタンク型炉適用性検討にて実施)

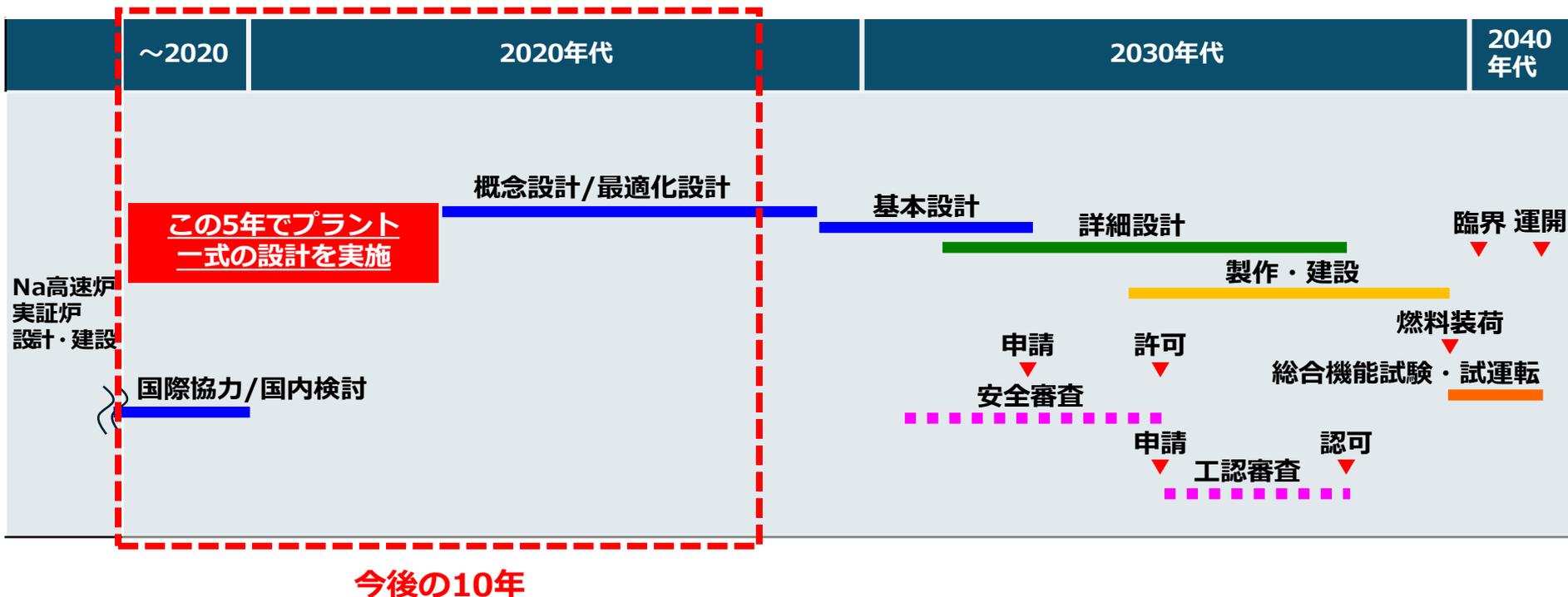
原子力発電のサプライチェーン



出典：平成26年6月19日総合資源エネルギー調査会 原子力小委員会 第1回会合参考資料

- 国内の原子力建設・保守は、原子力特有の技術を保有する**400社以上の**ビジネスパートナー（素材、機器、部品、検査、工事）によって支えられている。
- 高速炉建設のためには特殊なNa機器（炉心構成材料、ベローズ弁など）を供給できる**ビジネスパートナーの技術と品質が維持・向上されるように、継続的な工事が必要。**

【高速炉開発に関わる主要工程（三菱案）】



今後5年でプラント一式の設計を実施し、その後、実証炉の概念設計を開始することで、2040年代に技術の実証が可能と考える。

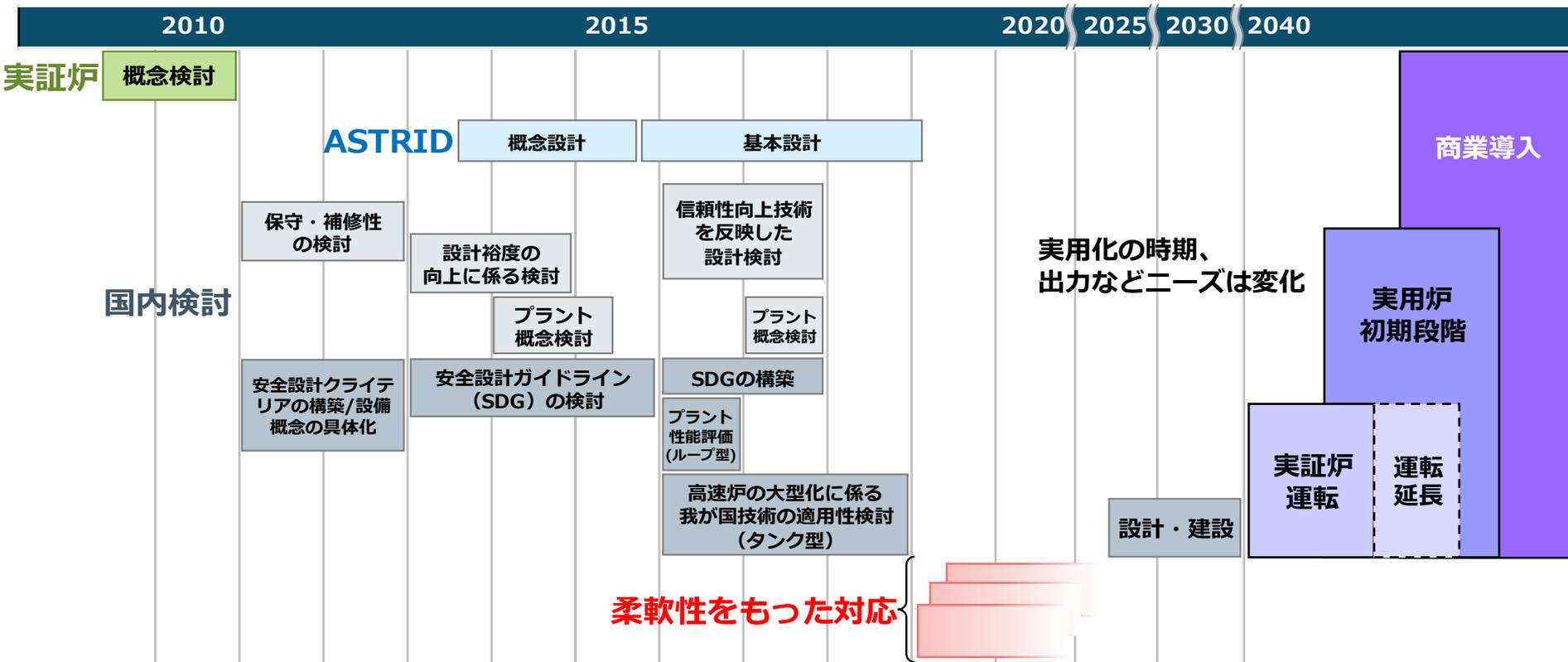
【高速炉開発の方針（2016年12月原子力関係閣僚会議決定）】

- プラントの基本設計思想と開発体制を固めていく実証炉の開発段階が極めて重要な役割を担うもの。
- 当面の間は、プラントデザインを決定するために**十分な技術的知見を獲得することに我が国の開発リソースを集中投入する**。
- 引き続き、**MOX燃料によるナトリウム冷却炉を念頭に高速炉開発を継続していく**。
その他の技術をめぐる国際動向についても情報収集を継続的に進め、今後の情勢に柔軟に対応できるよう、**戦略的な柔軟性**をもって対処していく。

【第5次エネ基】

- **高速炉開発の方針（2016年12月原子力関係閣僚会議決定）に基づき策定されるロードマップの下**、米国や仏国等と国際協力を進めつつ、**高速炉等の研究開発に取り組む**。
- 「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**する観点が重要である。(中略)
なお、こうした取組を進めるにあたっては、小型モジュール炉や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取り組みも踏まえつつ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**。

(7)今後の進め方ー柔軟性を有する開発ステップー

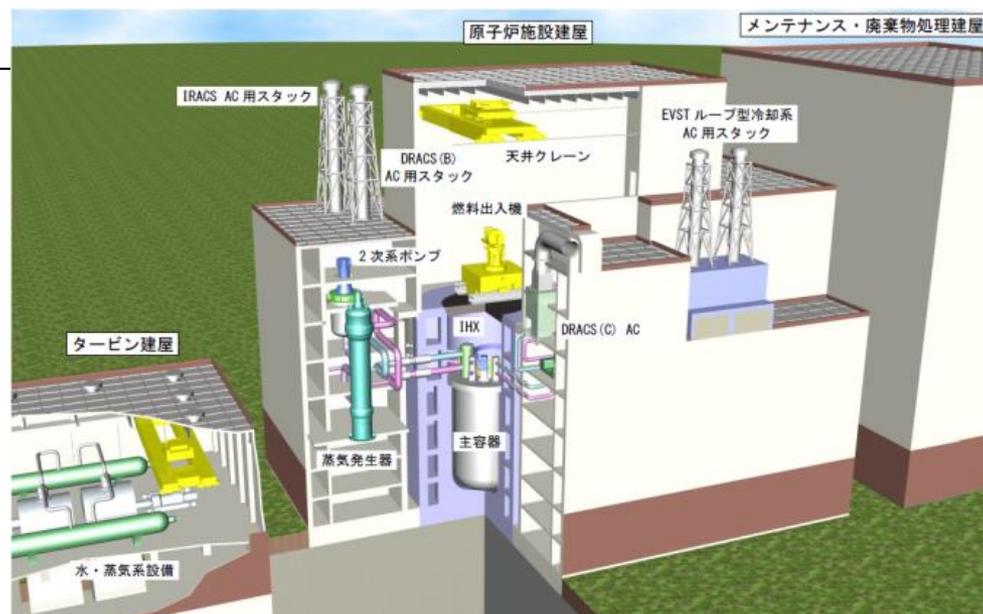


- 将来の電力需要、ウラン価格などの不確実性に対し、実用炉の出力、実用化時期などニーズも今後変化。
- 変化に柔軟に応えられる開発ステップとして、開発要素と期間を低減し、かつ大型炉への発展性を持つ実証炉を早期に開発。その後はニーズに応じて柔軟に対応。
- プルサーマルによる資源有効利用のためには軽水炉と高速炉の組み合わせが有効であり、その手段確保の観点での実証炉とすることが考えられる。

- 第5次工ネ基において「原子力関連技術のイノベーションを促進する観点が重要」、「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。」とあり、メーカーとしてそれらを踏まえ柔軟に対応していきます。
- このうち高速炉に関する柔軟な取組みとしましては、これまで検討してきた大型のナトリウム冷却高速炉に加え、イノベーションを取り入れた小型の高速炉など、幅広い検討も行い、国内外の市場による選択に応えられるよう技術と人材を維持、発展させてまいります。

柔軟性を持った対応の設計例（社内検討）

| | |
|-------------|--------------|
| 設計例 | (これまでの仕様) |
| 機能：Pu燃焼も考慮 | (増殖炉) |
| 炉型：タンク型炉 | (ループ型炉) |
| 出力：20万kWe級～ | (75～150万kWe) |



- 弊社はこれまでの高速炉開発において、「常陽」「もんじゅ」の炉心設計や安全評価等のエンジニアリングや、主要機器の設計、製作、現地工事、保守などを分担。各段階における技術や人材を蓄積。
- その後の実用化研究にも参画、2007年にMFBR設立、2014年から仏国ASTRIDの設計協力にも携わりタンク型炉の技術も習得。高速炉開発技術の拡充と人材の涵養に尽力。
- 既に我が国は、これまでの研究成果を実証炉の設計に反映できる段階。実証炉開発を担うメーカーとして、高速炉の導入が必要とされる時期に必要な技術が提供できる等、ユーザーズにお応えする為の技術の維持・伸長が責務。
- 弊社は高速炉開発会議の下、「高速炉開発の方針」に基づき、策定されたロードマップに則り、MOX燃料によるナトリウム冷却炉開発を念頭に、ASTRID協力などの国際協力を活用しつつ、自国の技術として、国内高速炉開発に貢献。
- また、今後、「エネルギー基本計画」に従い、多様なニーズに対応する為、その他の技術をめぐる国際動向についても情報収集を継続的に進めるが、高速炉開発は長期にわたるため、開発を継続できるよう予算の確保や開発に対するインセンティブが得られる国の制度策定が必要と考える。

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**