

[3K_PL02]

TOSHIBA

日本原子力学会 2021年秋の大会

新型炉部会セッション

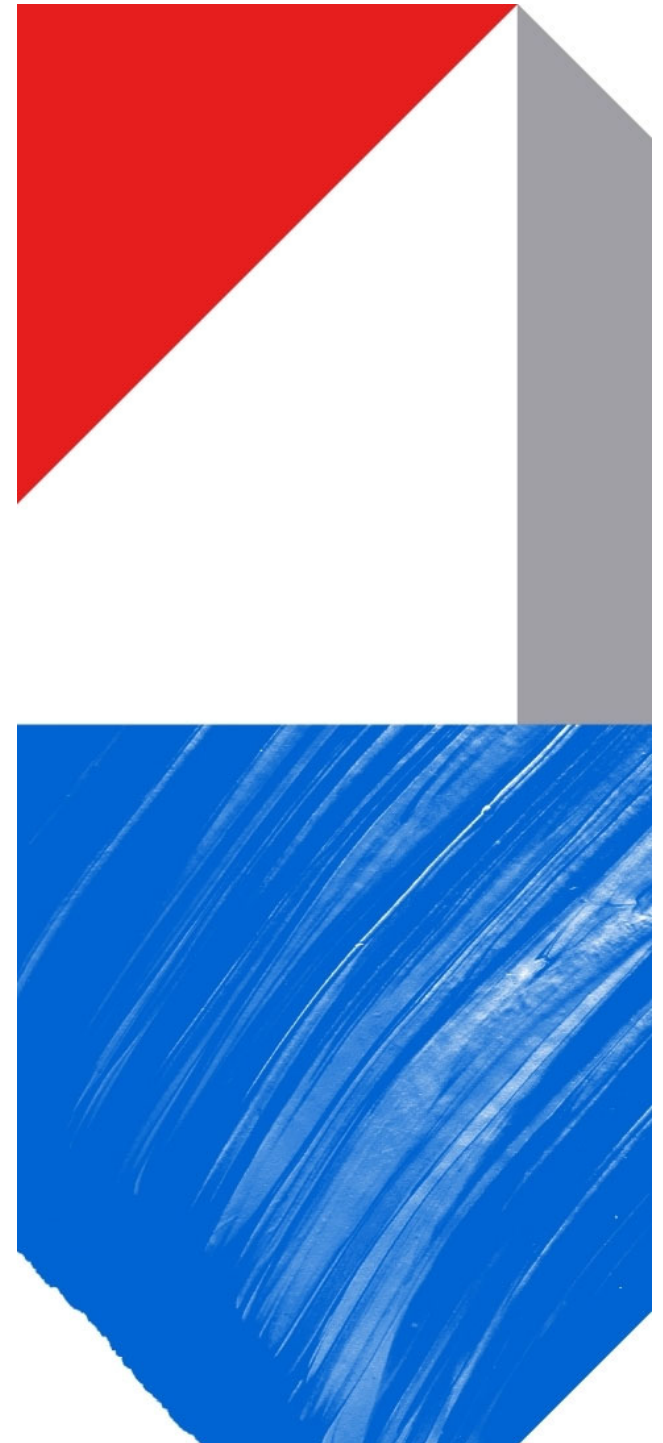
「原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況」

（２）早期実用化と機動的運用が可能な蓄熱型小型モジュール 高温ガス炉

2021年9月10日

東芝エネルギーシステムズ（株）

富士電機株式会社



目次

1. 開発体制
2. プラント概要
3. 実用化に向けた取り組みと課題
4. 開発工程
5. まとめ

目次

1. 開発体制
2. プラント概要
3. 実用化に向けた取り組みと課題
4. 開発工程
5. まとめ

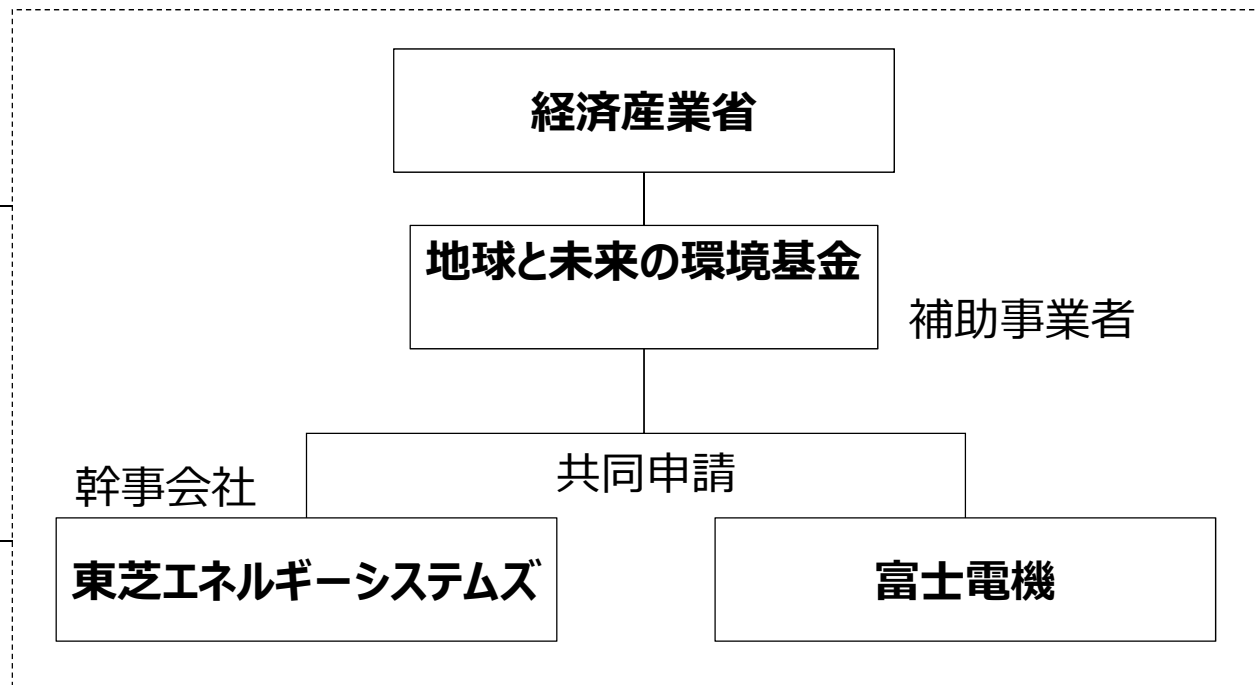
開発体制

- 東芝エネルギーシステムズ：全体システム取り纏め、冷却系等
- 富士電機：炉内構造物、蓄熱システム等

社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業

外部有識者委員会
・事業者・ユーザーサイドレビュー
・安全設計レビュー(外部専門家)

日本原子力研究開発機構
・プラント仕様レビュー
・安全設計レビュー



電力事業者、安全関係専門家の意見を反映

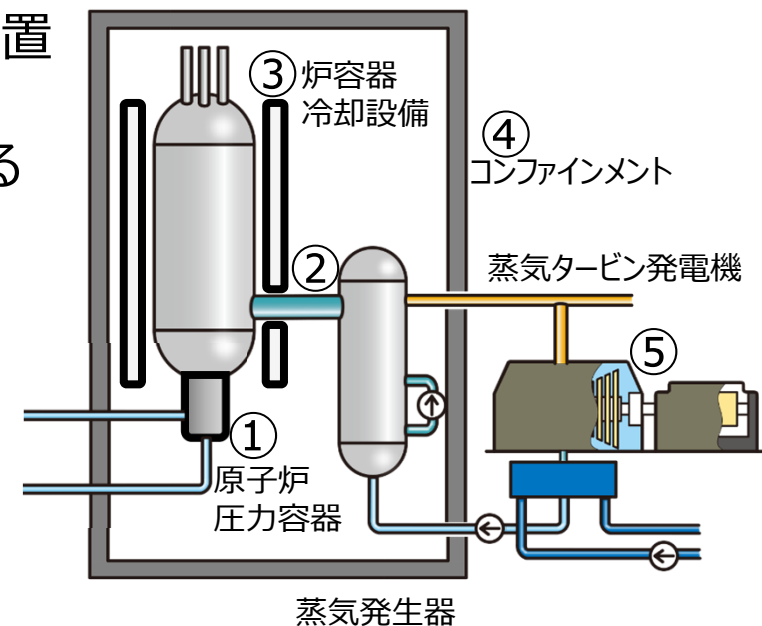
目次

1. 開発体制
2. プラント概要
3. 実用化に向けた取り組みと課題
4. 開発工程
5. まとめ

プラント概要 実用化に向けた開発方針

- 安全性向上に向けた取り組み
 - ✓ スリーベッセル※構造概念の導入 (②)
 - ✓ パッシブな自然循環冷却による事故時の崩壊熱除去 (③)
- 経済性向上に向けた取り組み
 - ✓ 原子炉出口温度を低温化し、RPVの材料を2・1/4Cr鋼から軽水炉で実績のある低合金鋼(Mn-Mo鋼)へ変更 (①)
 - ✓ RPVとSGの横並び (サイド・バイ・サイド) 配置による高温配管短縮 (②)
 - ✓ 固有安全性を生かした格納容器を不要とする閉じ込め概念 (コンファインメント) (④)
- 早期実用化に向けた取り組み
 - ✓ 実用化済みの蒸気タービン発電採用 (⑤)
(水素製造オプションも可能)

※スリーベッセル：原子炉圧力容器と蒸気発生器を横に並べ、これらの間を2重管構造の圧力容器で接続した構造。接続構造は圧力容器扱いとし、供用期間中検査を行うことで二重管破断回避を図る。



固有安全性を維持しつつ経済性向上により早期実用化

プラント概要 原子炉系の基本仕様

主要目	HTTR	実用炉	変更の考え方
原子炉熱出力	30MW	600MW	熱出力の最大化
冷却材	ヘリウムガス		同じ
原子炉入口温度	395℃	325℃	高温化による技術課題を回避し、実用的な選定
原子炉出口温度	850(950)℃	750℃	
冷却材圧力	4MPa	7MPa	高圧化によるコンパクト化
炉心構造材	黒鉛		同じ
炉心有効高さ	2.9m	8.4m	出力増加による大型化
平均燃焼度	22GWd/t	120GWd/t	JAEA殿開発中
出力密度	2.5MW/m ³	5.8MW/m ³	JAEA殿開発中
燃料	二酸化ウラン・被覆燃料粒子/黒鉛分散型		同じ
燃料体形式	ピン・イン・ブロック型		同じ
原子炉圧力容器	2・1/4Cr-1Mo鋼	Mn-Mo鋼	軽水炉の実績（材料）
原子炉圧力容器内径	5.5m	7.6m	出力増加による大型化
発電方式	—	蒸気タービン	発電機能を追加
閉じ込め機能	鋼製格納容器	コンファインメント	コスト低減等
炉容器冷却設備	強制水冷	空冷自然循環	パッシブ化による信頼性向上

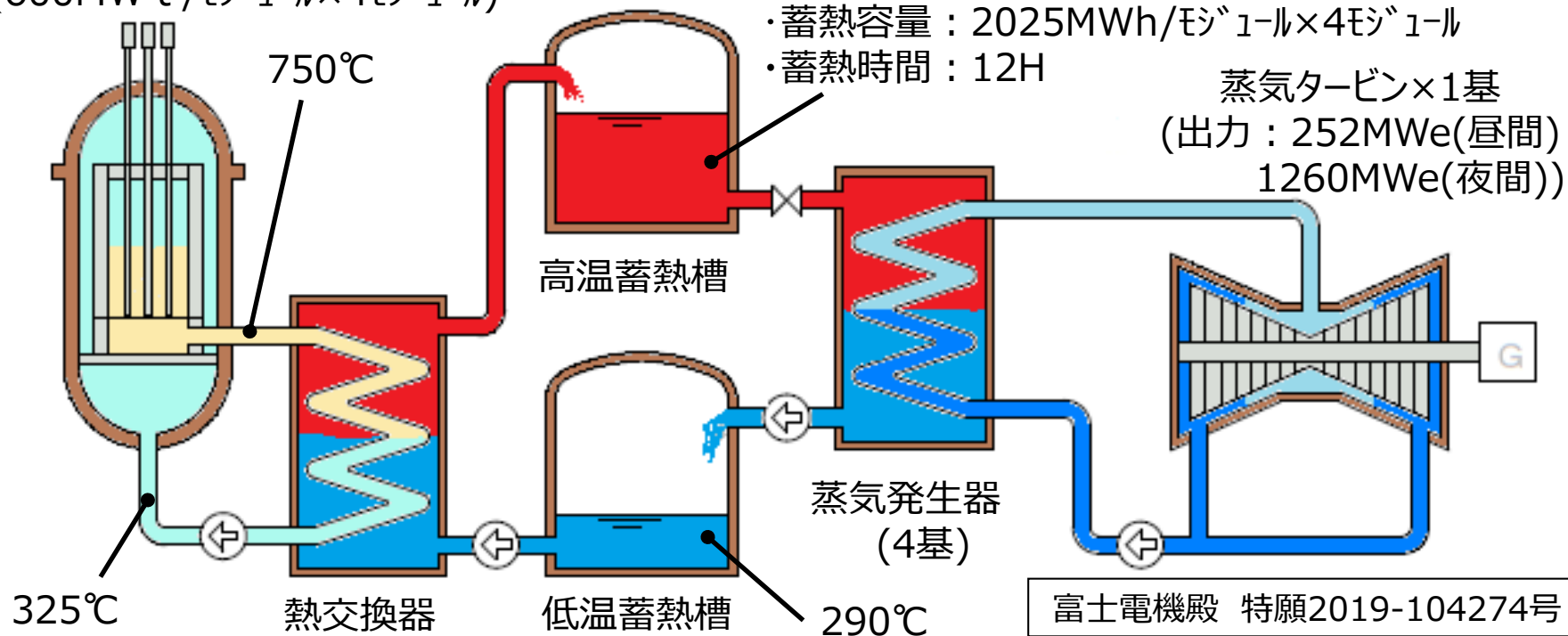
HTTRの実績に加え、実用化・経済性向上の施策を取込み

プラント概要 蓄熱システム有りの構成

- 高温ガス炉では蓄熱温度が高くでき、蒸気タービン系に最適な熱源
- 原子炉熱出力は一定で、蓄熱系で電気出力を柔軟に調整

原子炉(熱出力2400MWt)
(600MW t /モジュール×4モジュール)

- ・溶融塩 (Solar Salt($\text{KNO}_3(40\%)+\text{NaNO}_3(60\%)$)等 : 565℃
- ・蓄熱容量 : 2025MWh/モジュール×4モジュール
- ・蓄熱時間 : 12H

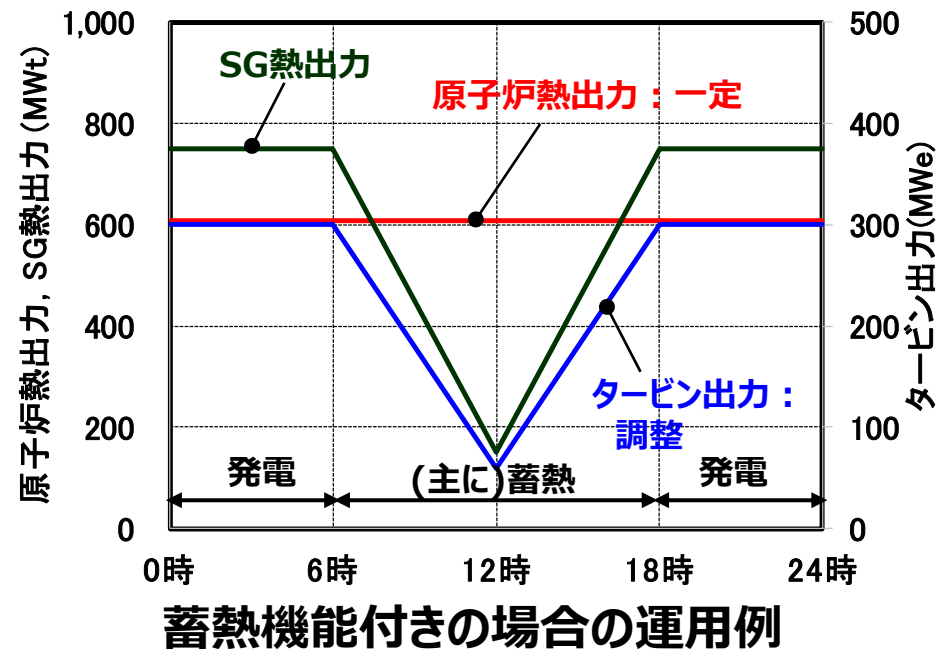


※1 溶融塩の融点 : 222℃、凝固点 : 238℃、※2 蓄熱槽容量 : 約26,000トン/槽、内径45m、高さ15m

実績のある2タンク構成を採用

プラント概念 蓄熱システムの運用例

- 原子炉熱出力一定：稼働率を下げずに発電調整可能
- 蓄熱システムで電気出力調整、蓄熱容量とタービン仕様を最適化
- 負荷要求に応じて蓄熱と発電を切替
- 最大出力時の夜間を定格，蓄熱主体の昼間は20%出力(最低出力)
(タービン最低出力20%より設定)



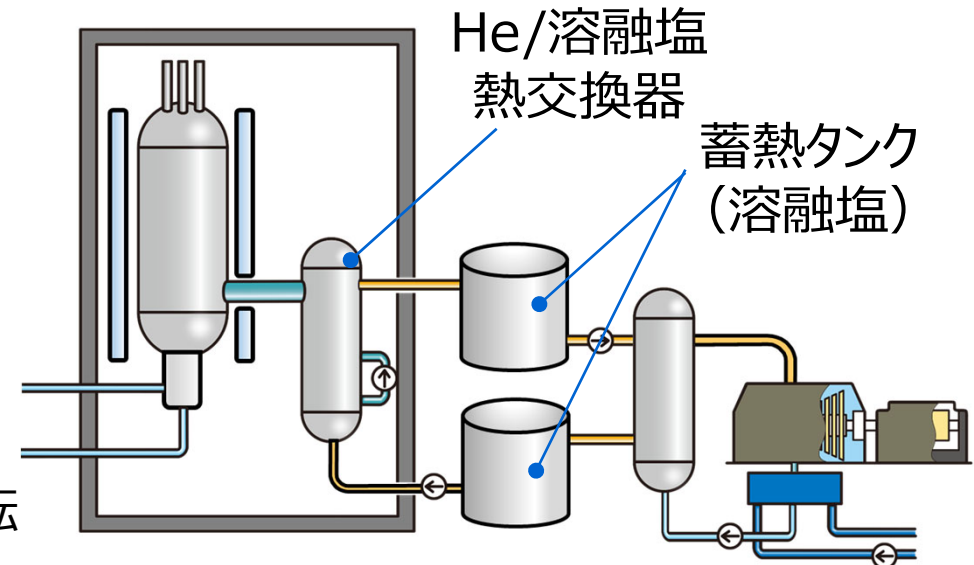
再エネの変動に合わせて発電量を柔軟に調整

プラント概念 蓄熱システムの安全シナリオ

■蓄熱システムの安全シナリオ構築

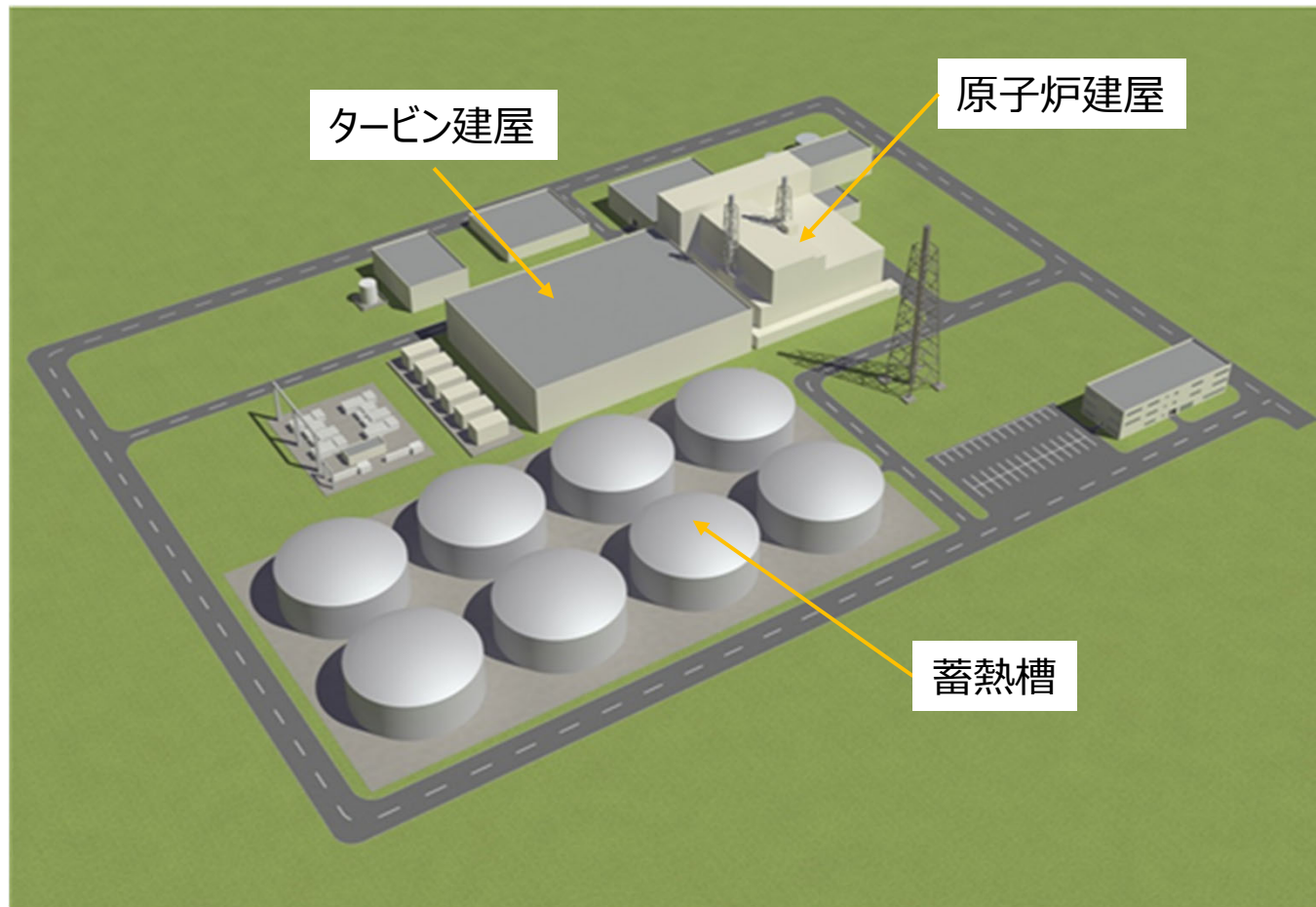
- ✓ 蓄熱システムを有するシステムの安全シナリオは、蓄熱システム無しの場合と比べて大きく変わることはない見通し。
- ✓ 1次冷却系と蒸気発生器は直接接続しないため、蒸気発生器の伝熱管破損による1次系への水侵入の想定は不要。
このため、水侵入による1次冷却材圧力の上昇、反応度添加、黒鉛酸化による炉心及び炉心支持構造物への悪影響については想定が不要。

蓄熱システムとの組み合わせ
再生可能エネルギーの出力変動に応じた運転



蓄熱システム無しの場合から、さらに安全上のリスク低減が可能となる見込み

プラント概要 プラント鳥観図



1GWe級の蒸気タービン発電プラントで350m×450m

目次

1. 開発体制
2. プラント概要
- 3. 実用化に向けた取り組みと課題**
4. 開発工程
5. まとめ

実用化に向けた取り組みと課題

- 早期実用化に向けた取り組み
 - ✓ 高温ガス炉の基本技術（黒鉛減速、被覆燃料粒子、ヘリウムガス冷却）は確立済。
 - ✓ 原子炉出口温度750℃、蒸気タービン発電等の確立済技術を活用し、開発リスクを排除。
- 技術的課題
 - ✓ HTTRで未経験な技術の成立性確認（サイド・バイ・サイド配置概念、自然循環冷却、スケールアップに伴う機器実証等）、平均燃焼度120GWd/t達成に向けた追加燃料照射
- 規制課題
 - ✓ 炉心溶融回避など固有安全性を活かした合理的な設備対応の実現（コンファインメントの採用等）
 - ✓ APC*、耐テロ等の新規制基準に関する設計対応と妥当性

*APC（航空機衝突 Air Plane Crash）

実用化に向けた取り組みと課題 規制・基準

- 「実用発電用原子炉及びその附属施設的位置、構造及び設備の基準に関する規則」について調査し実用高温ガス炉用の規則案の検討
 - ✓ 各条文案を策定：設計基準対処設備等の主な条文は高温ガス炉固有の記載に変更することで、規制主旨に大きな変更はなく対応可能。
 - ✓ 重大事故を防止する重大事故対処設備に関しては、対処すべき事象について高温ガス炉固有の記載に変更するとともに要件も変更。
 - ✓ 重大事故が発生した場合における規則については、高温ガス炉の特長を考慮して変更する。この場合にリスク評価、深層防護等の概念を活用する必要がある（米国等の規制案の活用）。

本年度、有識者レビューによるブラッシュアップを実施中

実用化に向けた取り組みと課題 安全性検討

● 安全評価事象の抽出

- ✓ マスターロジックダイアグラム（MLD; Master Logic Diagram）*に基づいて実用高温ガス炉の異常な過渡変化事象、設計基準事象、設計基準外事象候補を抽出。
- ✓ 事象抽出後に①カテゴリー分け、②主要事象のイベントツリー作成。③安全設計方針（案）の適合性確認を実施。

*頂上事象に至る可能性のある事象を演繹的に同定する手法

● 安全性試験の検討

- ✓ 試験例・設備を調査・分析し、許認可に向けて必要となる実証試験について検討し、技術開発計画へ反映する。
PIRT（Phenomena Identification and Ranking Table）の調査等。

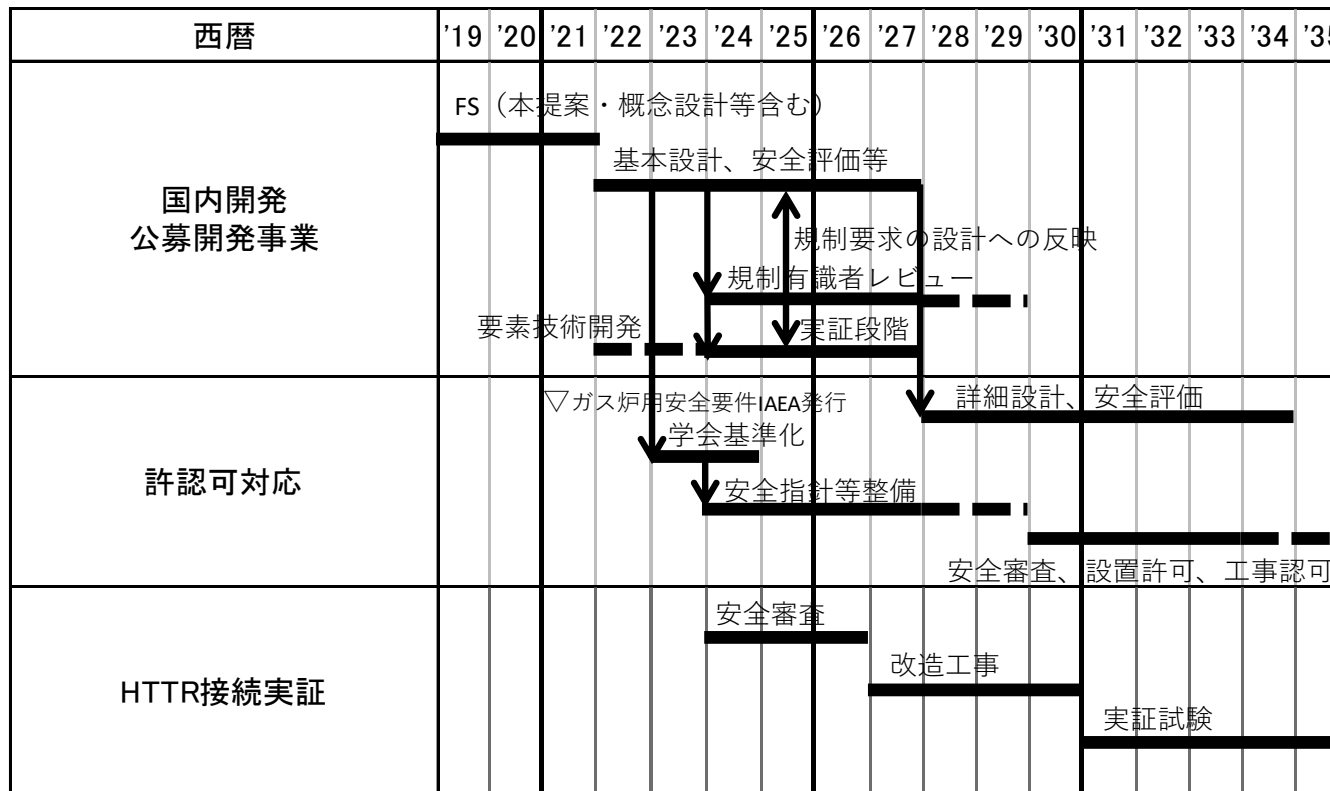
**小型高温ガス炉の特長を生かして
退避計画の負荷を低減したシステムを目指す**

目次

1. 開発体制
2. プラント概要
3. 実用化に向けた取り組みと課題
4. 開発工程
5. まとめ

開発工程

- 2020-2021：概念設計、安全シナリオ構築、PRA予備検討
- 2022-2024：基本設計、PRA評価、UPZ評価、実証試験計画
- 2025-2027：主要機器詳細設計、許認可課題対応、試験



政策やポテンシャル・オーナーの新設意向を踏まえ段階的に推進

目次

1. 開発体制
2. プラント概要
3. 実用化に向けた取り組みと課題
4. 開発工程
5. まとめ

まとめ

- 4モジュール構成をターゲットにプラント設計を推進。蓄熱システム有りで、敷地サイズは350×450m規模
- 蓄熱システムは電力需要の日変動を吸収できるタンク容量を設定
- 安全性検討ではMLDに基づいて安全評価事象を抽出
- 実用高温ガス炉用の規則案の検討に着手、実用化までの許認可計画の立案を継続
- 外部有識者による安全シナリオを含む全体計画をレビュー

実証済技術を基盤とし、早期実用化を推進

TOSHIBA

本発表は、経済産業省からの補助事業である「令和2年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含みます。