

## 第51回原産年次大会 セッション3 「原子力におけるイノベーション」

# 原子力発電プラントの安全性 および信頼性向上に向けた技術開発

東芝エネルギーシステムズ株式会社 原子カシステム設計部 システム計画担当 青木 保高

### 目次

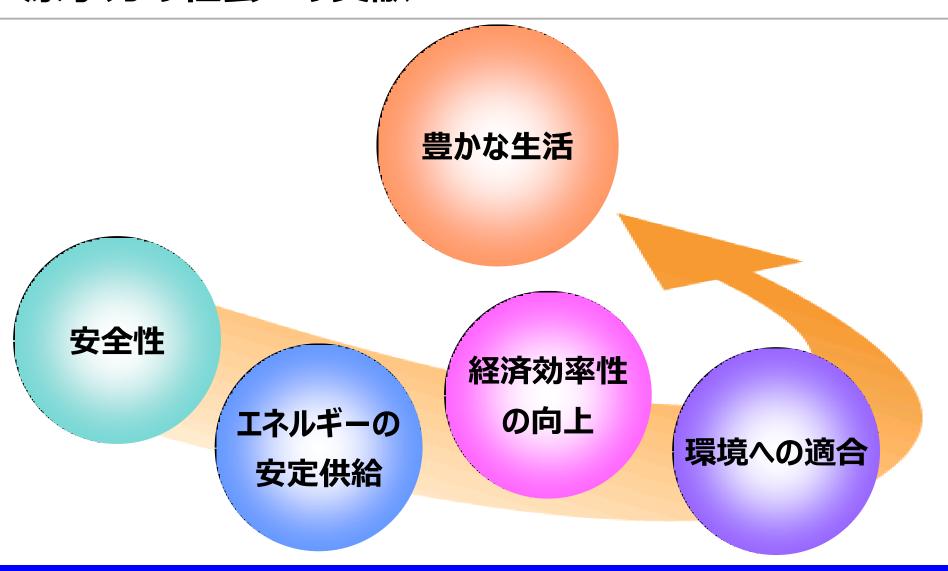
01 将来に向けた原子力の課題

02 安全性・信頼性向上に向けた技術開発

03 社会との共生に向けて

04 今後の取組み

### 原子力の社会への貢献



エネルギー基本政策(3E+S)に従い、人々の豊かな生活に貢献



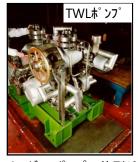
### 再稼働に向けた安全性向上対策

- ■対策設備の具体例
- ■高圧注水強化

原子炉隔離時冷却系ポンプ多重化 代替高圧注水系



SCiB™による電源強化 空冷電源(D/G,GTG設置)



タービン・ポンプ一体型ポンプ

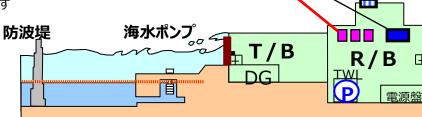
■監視計装の強化

ヒートサーモ式水位温度計

■マネジメント強化

シビア アクシデント マネジメント





SSV-2018-000006 Rev.0



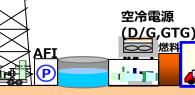
AFI:代替注水設備 D/G:ディーゼル発電設備 GTG:ガスタービン発電設備 R/B:原子炉建屋 T/B:タービン建屋 NRA:原子力規制庁

#### ■冷却システム強化

#### 空冷式熱交換器



中部電力株式会社様HPより引用



■注水システム強化(低圧)

低圧注水系耐震強化

SCiB™による直流電源強化

■水素対策·環境影響軽減

触媒式水素再結合装置 フィルターベント設備 水素濃度計



触媒式水素再結合装置



### 原子力が社会へ貢献し続けるためには

3E+Sの視点		課題
S	安全性	·自主的安全性向上 ·信頼性向上 (社会的受容性)
E	安定供給	·原子力人材の育成、確保 ·運転/保守作業の効率化
E	経済効率性	・発電コストの低減 (燃料、運営等)
E	環境適合	・放射性廃棄物の低減

### 様々な課題解決のためには、原子力のイノベーションが不可欠

### 目次

01 将来に向けた原子力の課題

02 安全性・信頼性向上に向けた技術開発

03 社会との共生に向けて

04 今後の取組み

### 原子力の課題解決に向けた技術開発

■ 薄型コアキャッチャ、水素処理システム、SiC炉心材料

<今まで> シビアアクシデント時の デブリ・水素対策 (注水強化、ベント対策)

- ●既設プラントの自主的安全性向上
- ノーベントの達成 (被ばく低減、社会的受容性)
- ●安全性・信頼性・経済性の革新的な向上
- バーチャルプラント (AI/ディープラーニング、VR、工事計画)

く今まで> 人間系の作業計画立案、 ノウハウの蓄積 現場での作業員の教育

- ●AI活用によるヒューマンエラー低減
- ●最適化による作業効率、経済性向上
- ●バーチャル空間での教育、訓練
- 高レベル放射性廃棄物の低減

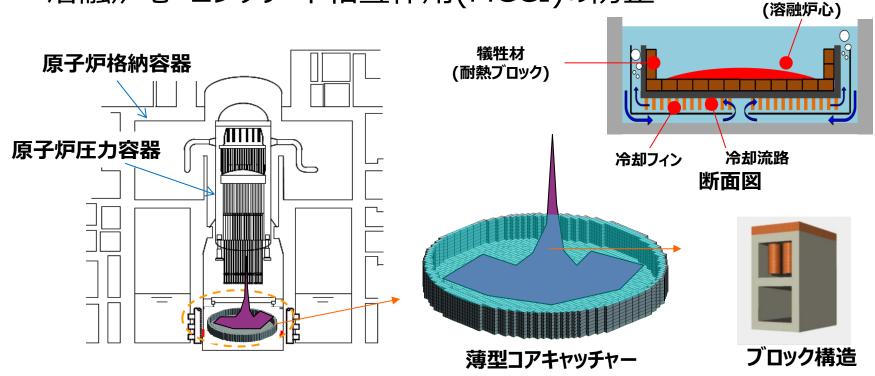
<今まで> 放射性廃棄物の地層処分 核のゴミとしての視点

- ●核変換による放射性廃棄物の低減
- ●新たな資源としての視点

### 薄型コアキャッチャー

- 設置スペースが限られる既設炉のさらなる安全性向上施策として開発
- シビアアクシデント(SA)時の溶融炉心保持

■ 溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)の防止

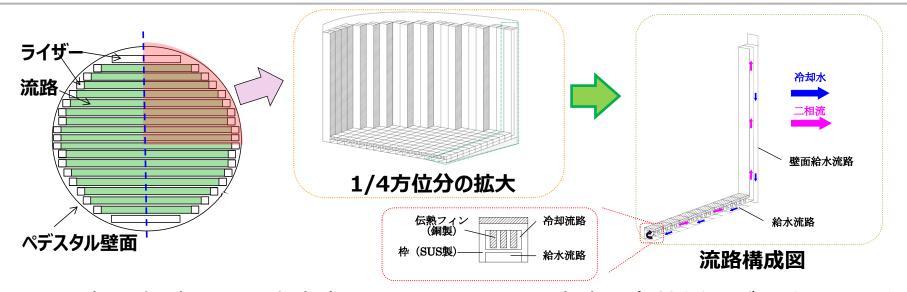


経済産業省H24-27年度発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業 薄型コアキャッチャーの技術開発に向けた基盤整備

落下デブリ

1F事故を踏まえた既設炉のさらなる安全性向上施策として開発を推進

### 薄型コアキャッチャー



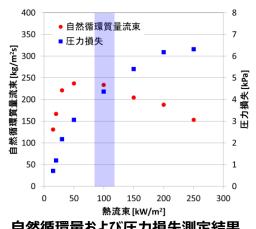
既設炉で想定される熱流束(100kW/m²)で、安定に自然循環が発生し、十分に

構造が健全であることを確認

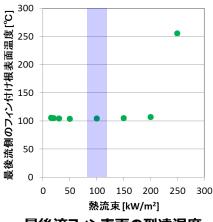
自然循環流量は50kW/m2でピークを持ち、 最大240kg/m²sの質量流束が発生

銅フィンの最高温度は300℃以下に冷却保 持されることを実験的に確認

国プロにおける概念検討完了後、 実機適用に向けた社内研究開発 を継続中



自然循環量および圧力損失測定結果

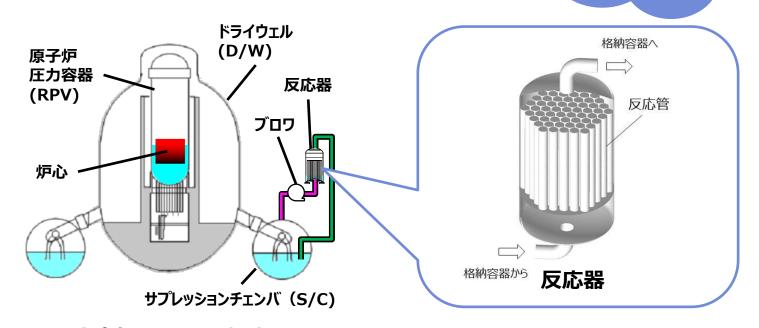


最後流フィン表面の到達温度

### 水素処理システム

- 水素による格納容器過圧を防止
- 水素及び放射性物質の漏えいを低減
- 除熱系との組み合わせでノーベント達成

PCV過圧破損防止 建屋水素爆発防止 被ばく線量低減



水素処理システム概念図

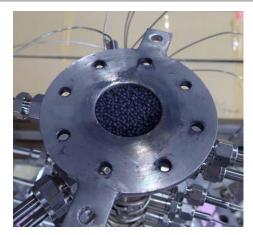
経済産業省H24-28年度発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業 シビアアクシデント時の水素処理システムの開発に向けた基盤整備

#### 事故時ノーベント達成による社会的受容性の向上



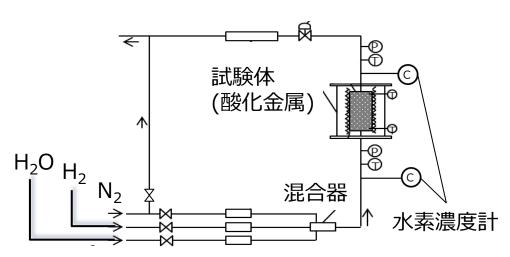
### 水素処理システム

- 金属酸化物による水素の酸化反応を利用  $(H_2+M_xO_y\rightarrow H_2O+M_xO_{y-1})$
- 反応材としてCuO, MnO<sub>2</sub>, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を選定
- 処理材消費及び水蒸気による劣化項を考慮した 反応速度式を立式
- 一次元反応器評価モデルを構築

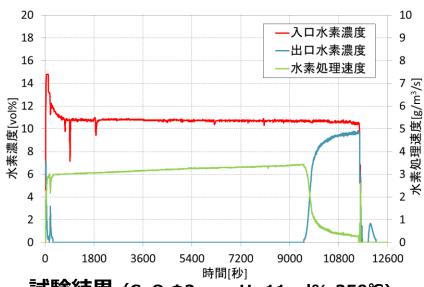


処理材充填状況

#### 実機適用に向けた開発を継続中



試験装置概要



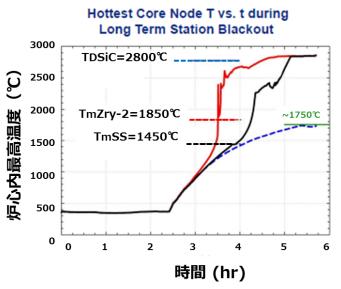
試験結果 (CuO Φ2mm ,H₂ 11vol%,250℃)

経済産業省H24-28年度発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業 シビアアクシデント時の水素処理システムの開発に向けた基盤整備

### SiC炉心材料

- 金属-水反応緩和によるSA時の水素発生量が低減
- ジルカロイ(1850℃)と比べて融点が高く(2545℃)、事故耐性が向上
- 熱中性子吸収断面積が従来材と比較して小さく、高燃焼度化による使用済燃料の発生量が低減

#### 事故時燃料温度挙動解析例(MAAP)



- ・ ジルカロイは水(水蒸気)と高温領域で急 激に酸化発熱反応し、水素を発生
- ・ SUSも融点以上に到達
- · SiCは反応が緩慢で低温で推移

Zry-2
SiC
Stainless Steel

Tm:融点

TD:熱分解温度

Westinghouse

C. Johnson, Henry, & Paik, らによるMAAP解析

ICAPP'12, WRFPM2014 より

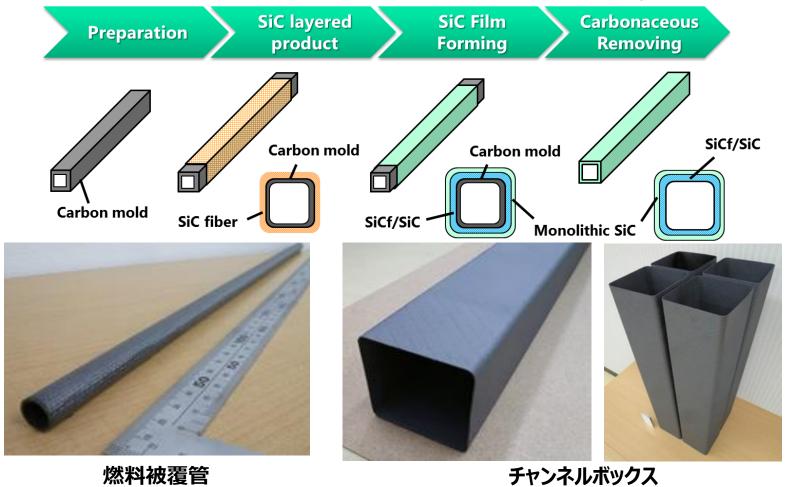
### 事故耐性強化による安全性向上と共に、燃料経済性を向上



### SiC炉心材料

■ 事故耐性を有し、かつ軽水炉環境での通常使用に適合する SiC複合材料の製造技術を開発。 Notes ....

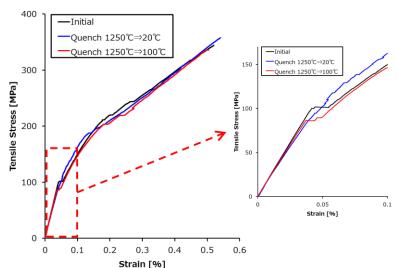
CVD: Chemical vapor deposition CVI: Chemical vapor infiltration



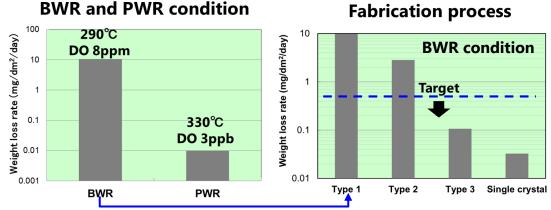
### SiC炉心材料

■ 長さ1mまでの短尺サンプルの試作及び評価試験を実施 (強度試験及び腐食試験結果)

#### **Result of Tensile test**



#### **Autoclave test for CVD (Chemical Vapor Deposition)-SiC**

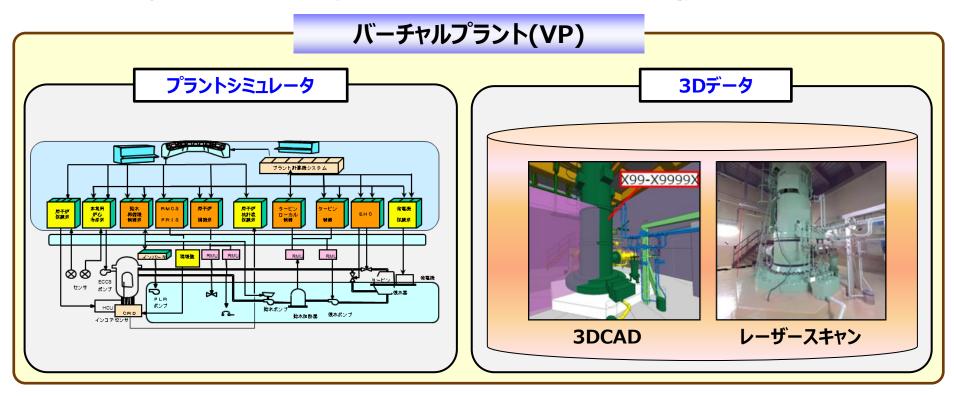


Corrosion rate significantly depends on water chemistry and the fabrication process

### 複合材構造設計の最適化と長尺(~4m)の 試作に向けた製造技術開発を実施中

### バーチャルプラント

- AI、ディープラーニングの活用
- 仮想空間を利用したエンジニアリング、メンテナンス、運用のサポート
- コンフィグレーションマネジメントデータベースとの連携



### 様々な技術を結集し、プラント運転時/停止時の運用を支援

### 電気アイソレーション支援システム

- 不十分なアイソレによる異常警報の発生、プラント運転停止を防止
- AI(ディープラーニング)によるヒューマンエラーの防止
- 人材減少対策としてのエンジニアによるアイソレ計画の効率化
- 作業員の教育・訓練にも活用

#### 従来のアイソレ検討・作業は人間系で実施

- ▶ 検討・実作業は、個人スキルに依存
- ▶ 使用図面は、広範囲かつ膨大
- ▶ 動作検証は、紙図面上で実施



信頼性、作業量が

全て人に依存

### 支援システム (人への依存が少ないシステム)

#### 紙図面の構造化 機能



アイソレ自動立案機能



アイソレ計画評価機能

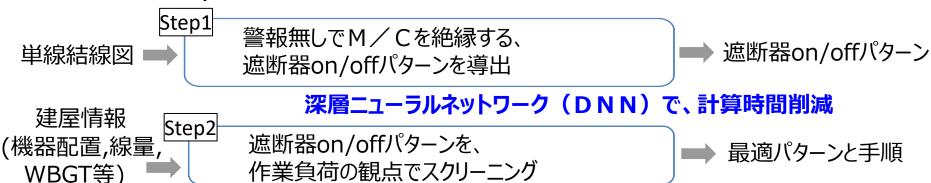
紙図面から回路情報を抽出

AI等を活用し、アイソレ対 象箇所を自動選定・立案 妥当性(影響)を評価し、 図面上に表示

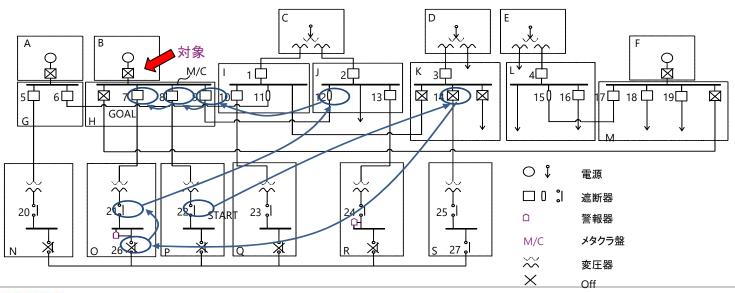
#### プラント運転中の信頼性を確保すると共に、作業員教育にも活用



- 警報無しで検査対象(M/C)を絶縁する
- 遮断器on/off パターンを作業負荷の観点で作成する

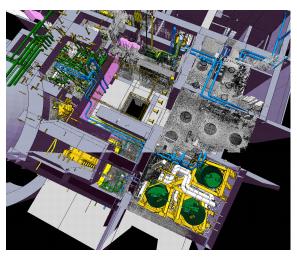


#### 深層Qネットワーク(DQN)で、曖昧な情報の解釈



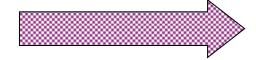
# バーチャルリアリティ(VR)

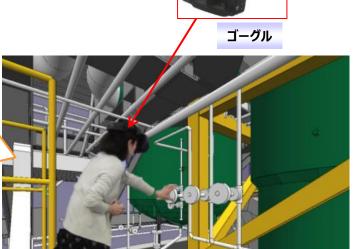
- 設計3Dデータを自由な角度から視認
  - ▶ 複雑なプラント内の空間・設備配置を効率的に識別
  - > 機器の位置や現場作業性の疑似体験



3 **Dデータ** (レーザースキャン/3DCAD)







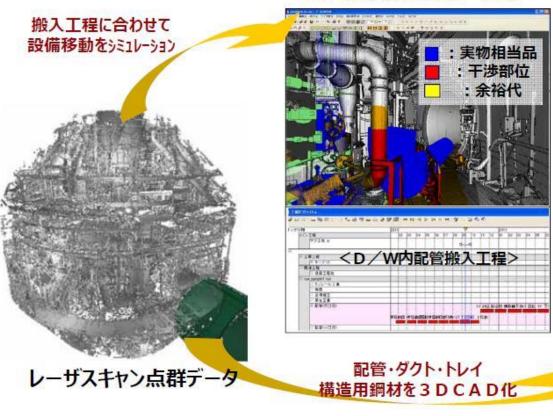
VRで立体表示

VRを用いた疑似体験による現場作業の事前確認、訓練にも活用可

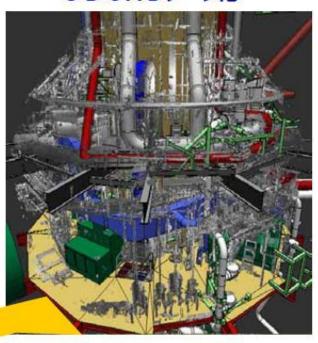
## レーザースキャン/3DCAD

- 高所や離れた部品の位置情報を正確に取得し、情報を3Dデータ化
- データは時間・場所の制約を受けずにPC上で配置調整、確認可能

干渉物確認シミュレーション



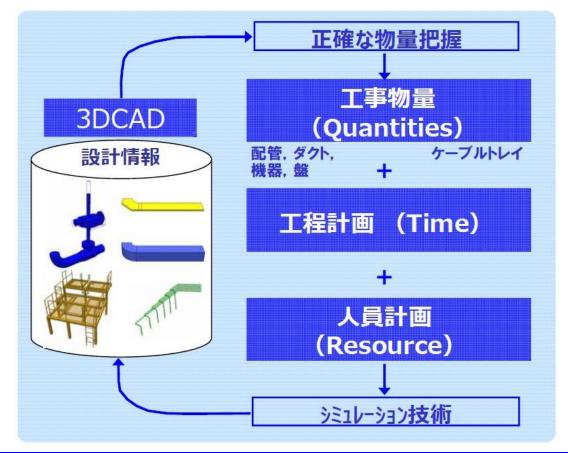
3 D C A Dデータ化



干渉等による現場撤去範囲の最小化、3Dデータは他用途へも活用

### 6DCAD™

- 従来3DCAD情報と工事物量、工程計画、人員計画を一括管理
- シミュレーション技術の適用による最適工事計画立案を支援



最適な工事計画により、工期の短縮、工事費用の合理化を実現



### 高レベル放射性廃棄物の低減

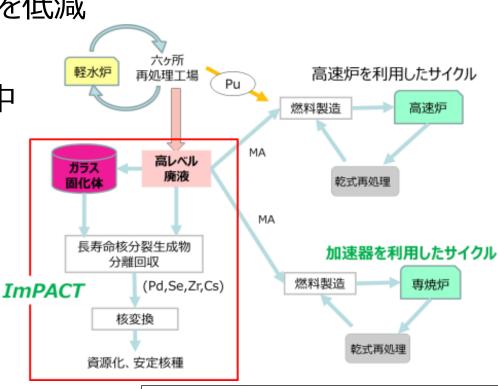
### 内閣府 革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)にて研究開発中

- 廃棄物から有用元素を回収して資源として利用
- 安定核種に核変換し放射能を低減
- LLFP\*の分離回収で

2テーマの研究実施中

- 高レベル放射性廃液から、 電解、吸着、溶媒抽出を 用いた回収
- ▶ ガラス固化体から、化学還元、 電解精製を用いた回収
- \*長寿命核分裂生成物

(LLFP:long lived fission products) 半減期の長い放射性同位体元素で、Se-79、 Zr-93、Pd-107、Cs-135を対象とした研究



本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の一環として実施したものです

#### 資源問題と廃棄物低減の観点における環境問題を同時に解決していく



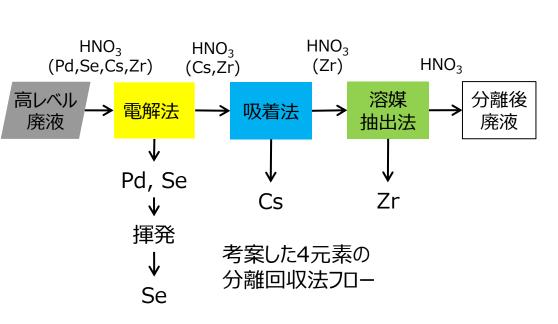
### **ImPACT**

### 高レベル放射性廃液からのLLFP回収プロセスの実用化

- 電解法(金属回収容易)と、吸着法・溶媒抽出法(元素分離に有効)の組合せ
- 半減期数十万年以上のLLFPを含むPd,Se,Cs,Zrを分離回収(回収率90%以上)

### 特徴

- ▶前処理不要:高レベル廃液をそのまま処理
- ▶液性をほとんど変えない:硝酸系の湿式電解、回収
- ▶二次廃棄物発生量低減:吸着材再生



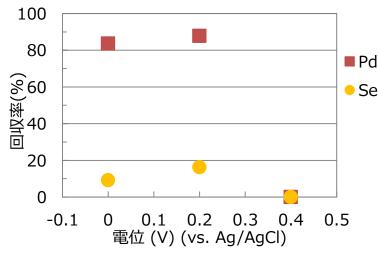


図 電解法によるPd,Seの回収例

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の一環として実施したものです

### **ImPACT**

### ガラス固化体からのLLFP回収プロセスの実用化

- ガラス固化体からLLFPを取り出す技術開発
  - ①溶融塩中の化学還元:ガラス主成分のSi-O網目構造を99%分解(\*)
  - ②溶融塩電解精製:還元生成物からPd,Zrを分離回収の見込み
  - ③溶融塩中溶解成分から、Seを99%回収可能なことを確認。 Csは原理的に回収可能なことを確認

還元剤(Ca) SiCl<sub>4</sub>↑ 揮発物 陰極回収物 ガラス 還元生成物 雷解精製 固化体 Zr Si-Pd, Si-Zr, Se, Cs **PGM** 陽極残渣 塩中溶解物 AM, AEM CaSi等 Pd Si ケイ素 ZrB 等 再生電解 0 酸素 ■ 核分裂生成物 (Pd,Zr,Se,Csなど) AM:アルカリ金属, AEM:アルカリ土類金属 ガラス固化体内部のイメージ Se回収 ガラス固化体 PGM:白金族 (\*);深地層処分環境と異なる反応場条件 CaCl<sub>2</sub>



本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の一環として実施したものです

### 目次

01 将来に向けた原子力の課題

02 安全性・信頼性向上に向けた技術開発

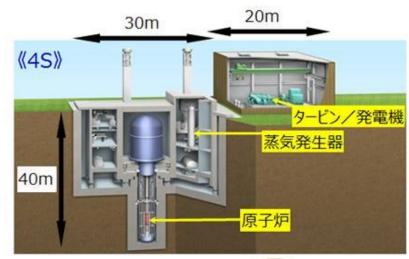
03 社会との共生に向けて

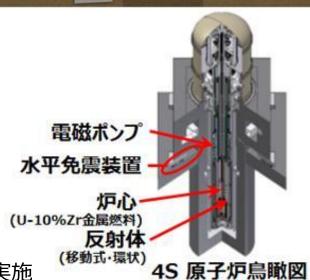
04 今後の取組み

# 4S (Super-Safe, Small and Simple)

#### <u>特徴</u> 高い安全性/信頼性に基づく長期運転

- ナトリウム冷却型小型高速炉 出力 10MWe~50MWe
- <u>長期</u>燃料交換間隔 10MWe:30年、50MWe:10年
- <u>自然現象を活用</u>した安全設計 <u>事故時も人的操作</u>なしで 自然に炉停止・除熱
- 革新技術 電磁ポンプの採用により炉内から 回転機器を排除 仏国高速炉ASTRID冷却系に適用予定



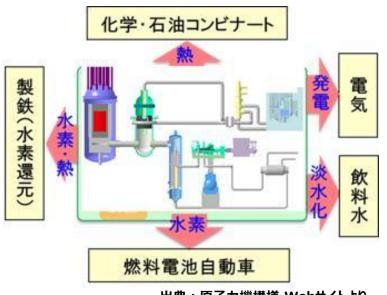


NRCとの予備審査まで実施

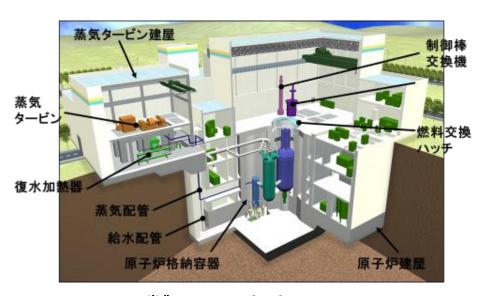
「遠隔地での長期運転」を可能としつつ、高い安全性と信頼性を達成

### 高温ガス炉

- 優れた安全性
  - 耐熱性に優れたセラミックス被覆燃料→<u>燃料溶融しない</u>
  - 黒鉛減速材による事故時の緩慢な温度変化→事故時の早急な対応不要
  - 不活性なヘリウム冷却材→燃料と化学反応しない(<u>水素・水蒸気爆発しない</u>)
- 多様な熱利用(発電、海水淡水化、水素製造等)



出典:原子力機構様 Webサイトより



出典: JAEA-Technology 2013-016, pp.166

固有の安全性を有し、「水素社会との共生」等、 「多種多様な要求へ対応」していく



### 目次

01 将来に向けた原子力の課題

02 安全性・信頼性向上に向けた技術開発

03 社会との共生に向けて

04 今後の取組み

### 今後の取組み

- ■原子力のさらなる発展に向け、安全性向上を最優先としつつ、安定供給、経済効率、環境適合を高めていく技術開発により、新たな価値を提供します
- ■原子力の社会的受容性を高めるため、様々な技術 的課題の解決へ挑戦していきます
- ■原子力人材の確保・育成にも積極的に貢献し、原子力の技術・経験を未来へ繋げていきます

### 原子力のイノベーションを通じ、常に社会へ貢献し続けていく

# **TOSHIBA**

**Leading Innovation**