

事故耐性燃料開発に関するワークショップ

SiC被覆管／チャンネルボックスの開発

TOSHIBA

東芝エネルギーシステムズ株式会社

2023.12.14

分類 1

PSNN-2023-0930

NNO-2023-000078 Rev.1

目次

1. 開発の背景

事故耐性炉心材料候補としてのSiC複合材

SiC炉心材料の適用によるベネフィット、市場規模

2. 東芝のSiC炉心材料開発取組み

開発体制、開発ロードマップ

3. 成果概要

- ・SiC複合材の構造と製造方法

- ・主な取得データ（炉外試験、照射試験（計画含む））

4. 実用化に向けた主な技術課題

まとめ

01

- **開発の背景**
- **ATF候補材としてのSiC複合材**
- **SiC炉心材料の適用によるベネフィット**
- **市場規模**

開発の背景

● 背景

- ✓ 津波による原子炉冷却機能喪失
- ✓ 崩壊熱による燃料温度上昇
- ✓ 高温領域におけるジルカロイの急激な酸化発熱反応発生
- ✓ 多量の水素発生及び水素爆発、炉心溶融へ進行
- ✓ SAに至るまでの時間マージンを拡大するには、ジルカロイに代わる炉心材料が必要



ジルカロイに代わる耐熱・耐酸化性に優れた炉心材料への変更を検討

概略温度 (°C)



事故耐性炉心材料候補としてのSiC複合材

- 高温水蒸気との反応速度がジルカロイより低い
 - 酸化脆化が少ない、水素発生が少ない
- SiC単体は脆性であるが、繊維複合化により擬延性を付与
 - 急冷にも分断されない
- 高温強度が高い
 - 内圧によって膨れにくく、流路を閉塞しない
- 中性子吸収が小さい（Zrに比べて～20-30% 低い）
 - 燃料経済性の観点で有利

SiC炉心材料の適用によるベネフィット

【既設プラントへのバックフィット】

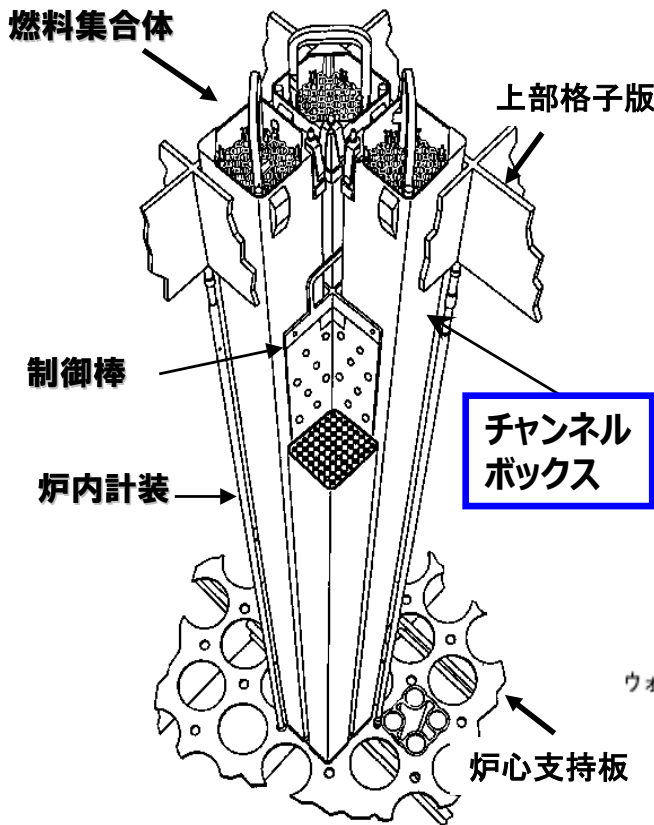
- ✓ 材料性能を活かしたU²³⁵濃縮度5%超による高燃焼度化
- ✓ **耐熱性向上による熱的制限緩和と安全性向上**
- ✓ 確率論的リスク評価（PRA）での炉心損傷頻度（CDF）低減
- ✓ **燃料耐震性向上**による地震時制御棒挿入性裕度向上
- ✓ **燃料耐震性向上**による炉内構造物耐震裕度向上

【新規プラントへの導入】

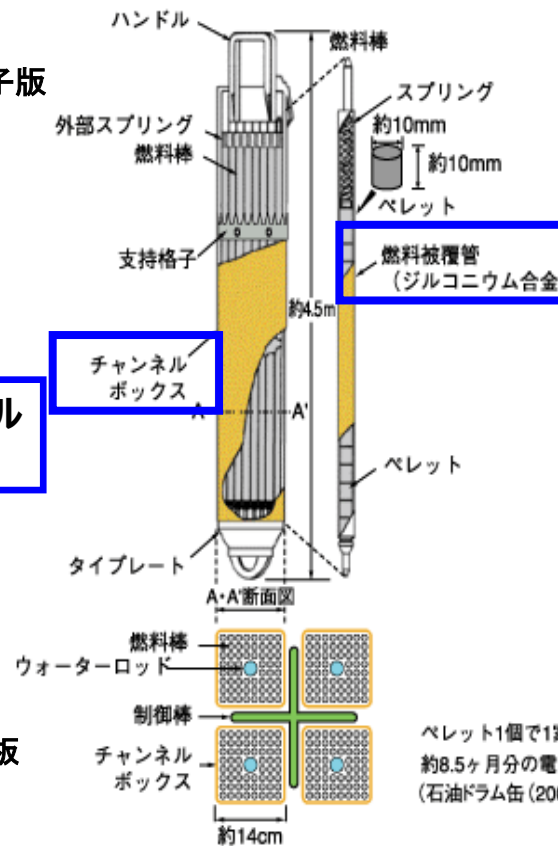
- ✓ 安全系合理化によるシステム簡素化・安全性向上
- ✓ **燃料耐震性向上**による炉内構造物、建屋合理化

軽水炉内でジルカロイが使用されている機器

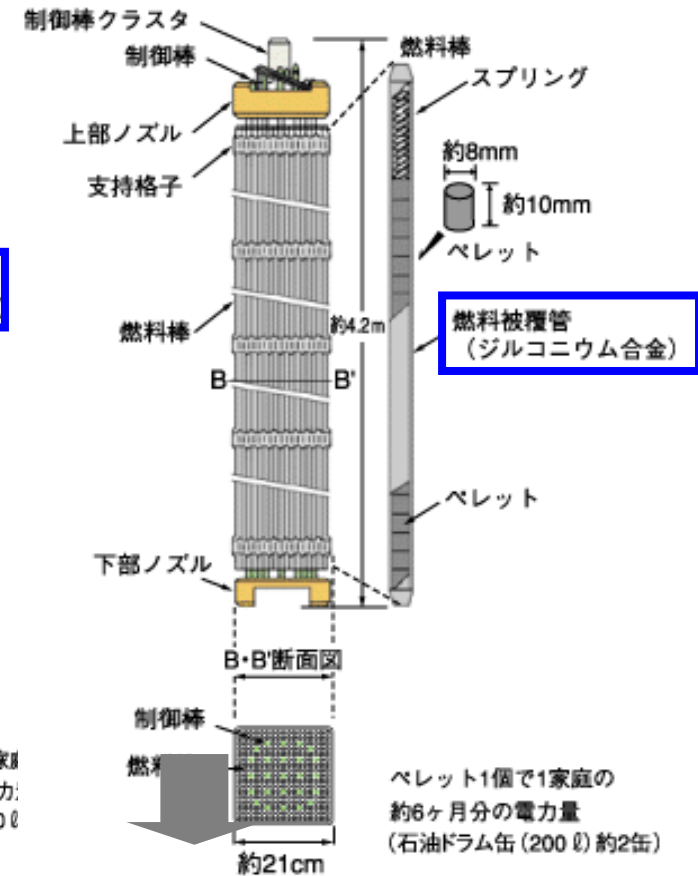
BWR炉内構成



BWR燃料集合体



PWR燃料集合体



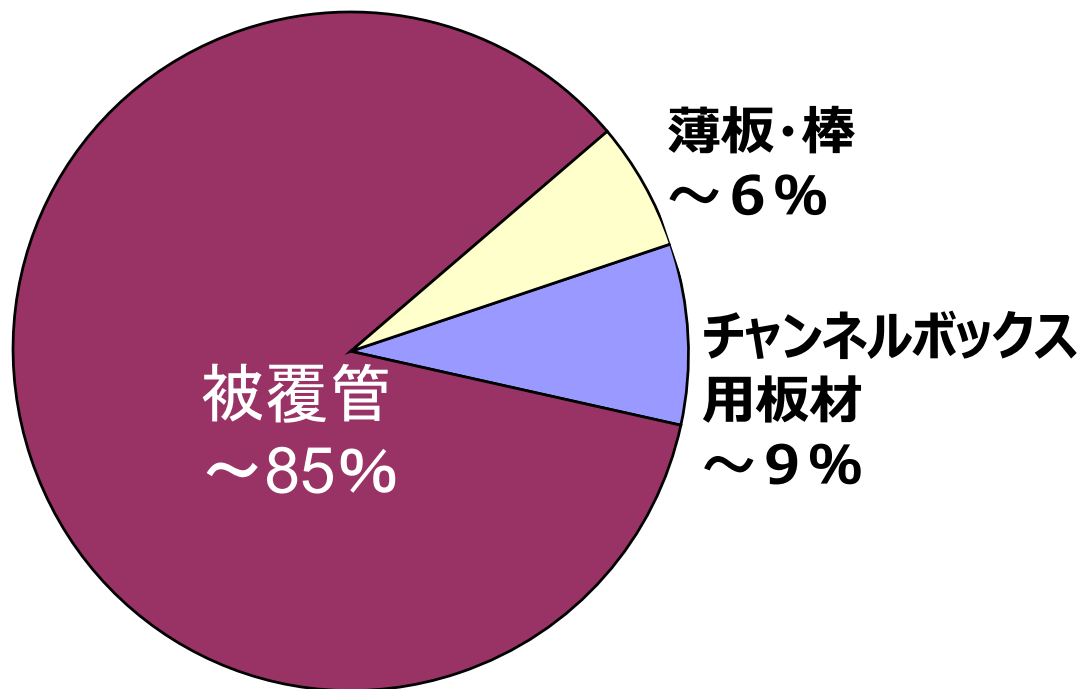
約1200℃以上で急激な酸化発熱反応により水素が発生するジルカロイは、被覆管やチャンネルボックスで多量に使われている。

軽水炉用炉心材料（ジルカロイ）市場規模

原子力用ジルカロイ需要：～4000トン/年

（中国、ロシア、旧東欧諸国需要は含まない。2011年需要まとめ）

原子力用ジルカロイの適用割合



被覆管

年間 ～350万本

チャンネルボックス

年間 ～1万本

02

- **東芝のSiC炉心材料開発取組み**
- **開発体制、開発ロードマップ**

東芝のSiC炉心材料開発取組み

- **軽水炉燃料のジルカロイ被覆管の代替**

- 耐高温腐食性、中性子経済の優れたSiC材による燃料経済性向上
- ウエスチングハウス、東芝は共同で2000年代半ばから被覆管などへの適用を目指し、自社研究を開始

- **3.11以降、SiC炉心材料開発を加速**

- 国家予算（文部科学省（MEXT）、経済産業省（METI））にて、SiC材のチャンネルボックス、被覆管材の開発を加速

- MEXT「安全性を追求した革新的炉心材料利用技術に関する研究開発」（2012年度～15年度）

- METI「SiC炉心材料の開発」

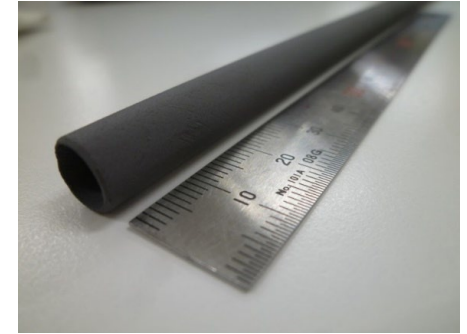
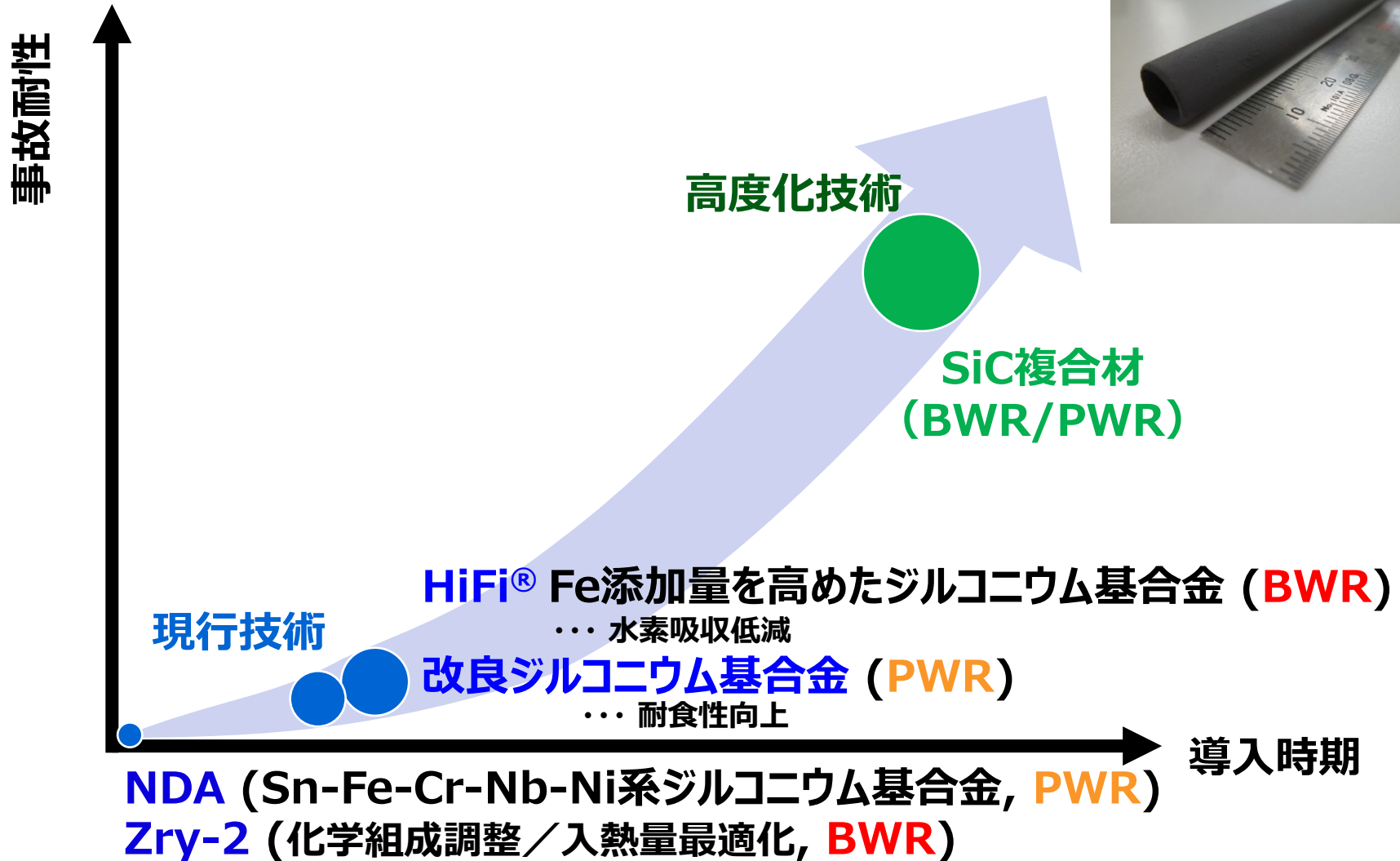
Phase-1：SiC複合材の適用性、製造性（2012～14年度）

Phase-2：製造性、接合技術開発、検査技術開発（2015～18年度）

Phase-3：フルスケール試作、評価試験、検査技術開発（2019～22年度）

Phase-4：フルスケール製造技術開発、試験・検査技術開発（2023年度～）

東芝グループの燃料被覆管安全性向上への取組み



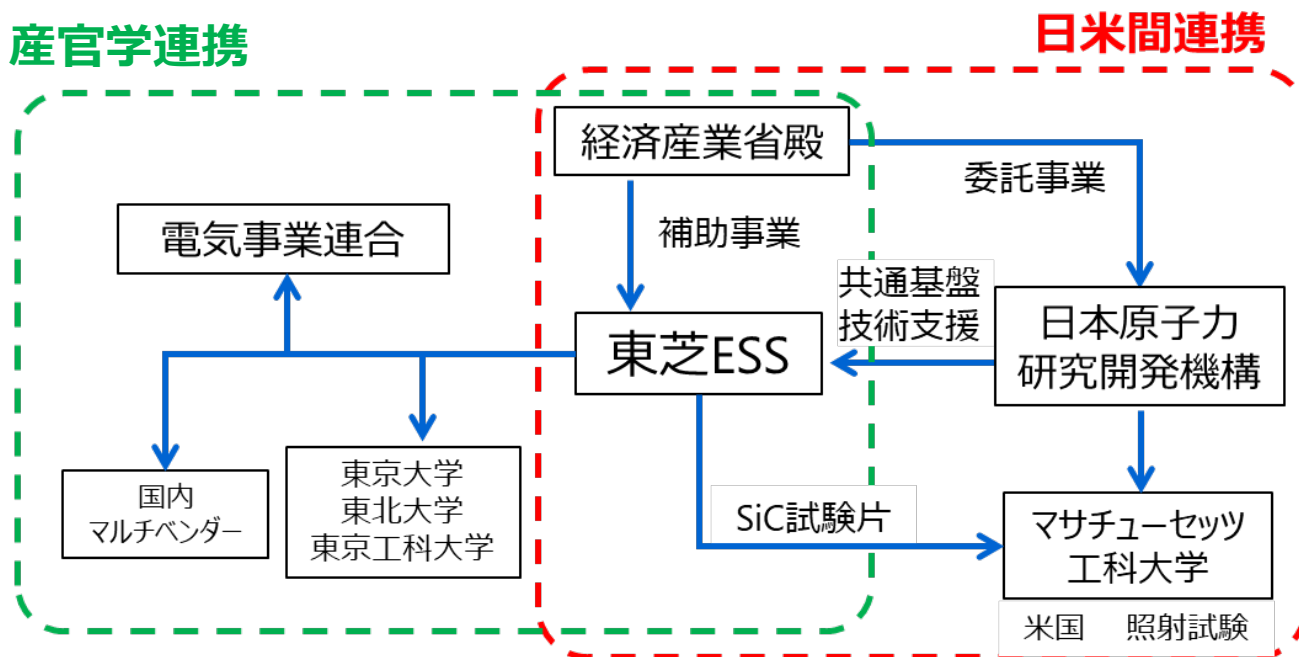
開発体制

・エネルギー補助事業 SiC炉心材料の開発(Phase4)

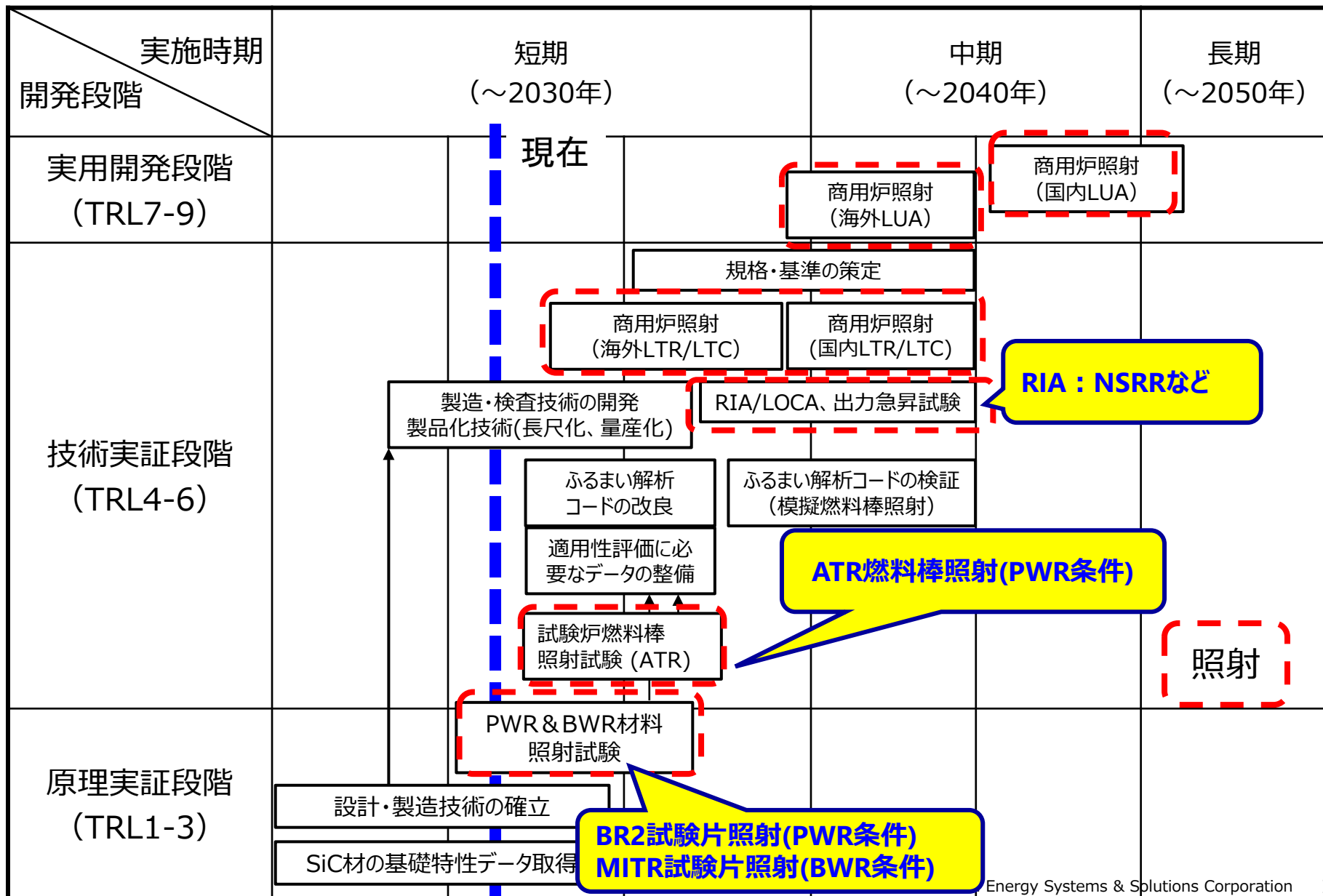
- 産官学連携で過酷事故時の水素発生を抑制できる炉心材料を開発(2012年度～)
- 2030年～ 国内SiCチャンネルボックス実機導入に向けて鋭意研究開発中。

・エネルギー委託事業 新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備

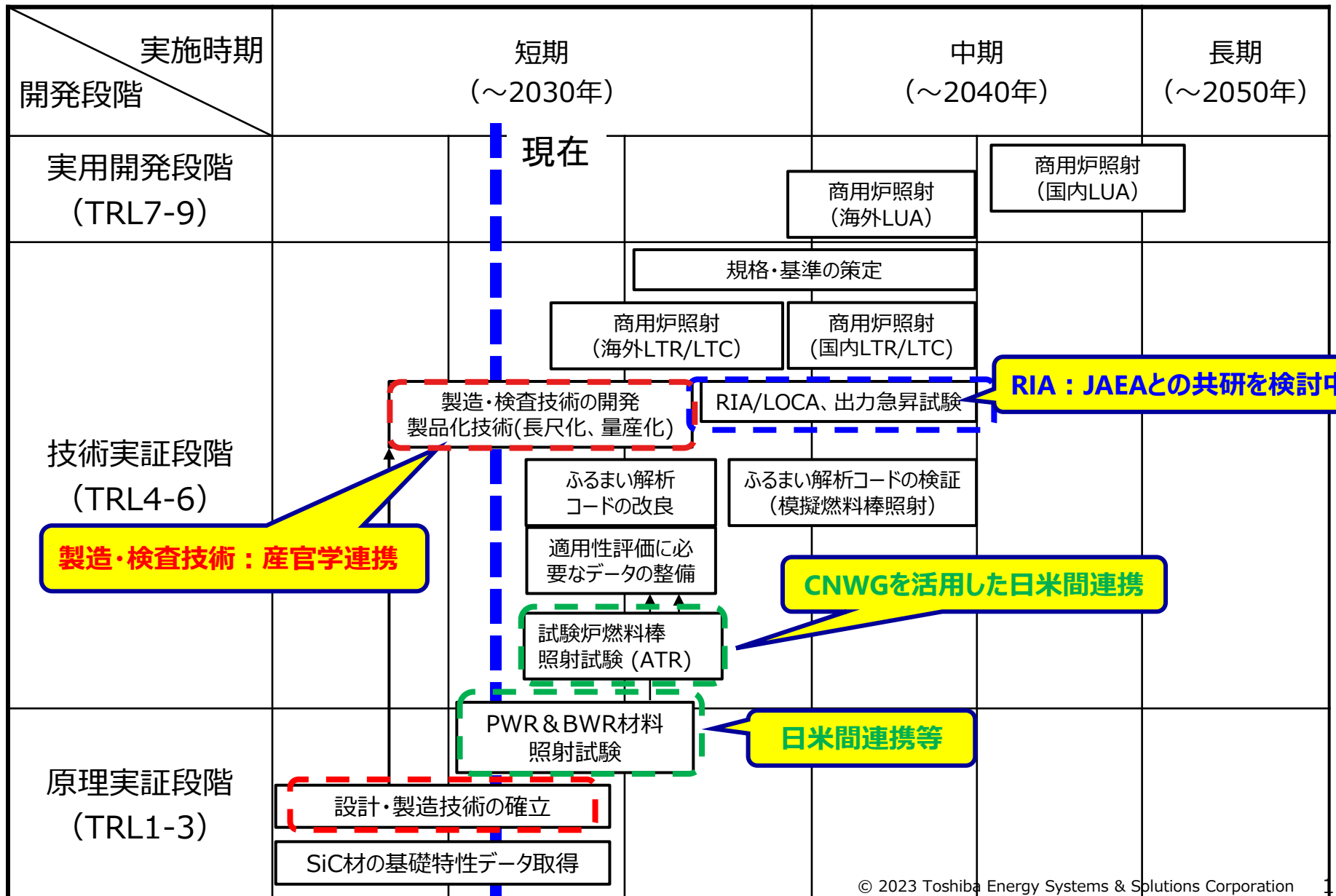
- 技術基盤整備、海外機関との連携強化、照射試験スキーム構築(2019年度～)
- 補助事業で開発した試験片を供給、米国で照射試験を実施する（日米間連携）



SiC炉心材料開発 ロードマップ



SiC炉心材料開発（産官学連携、日米間連携）



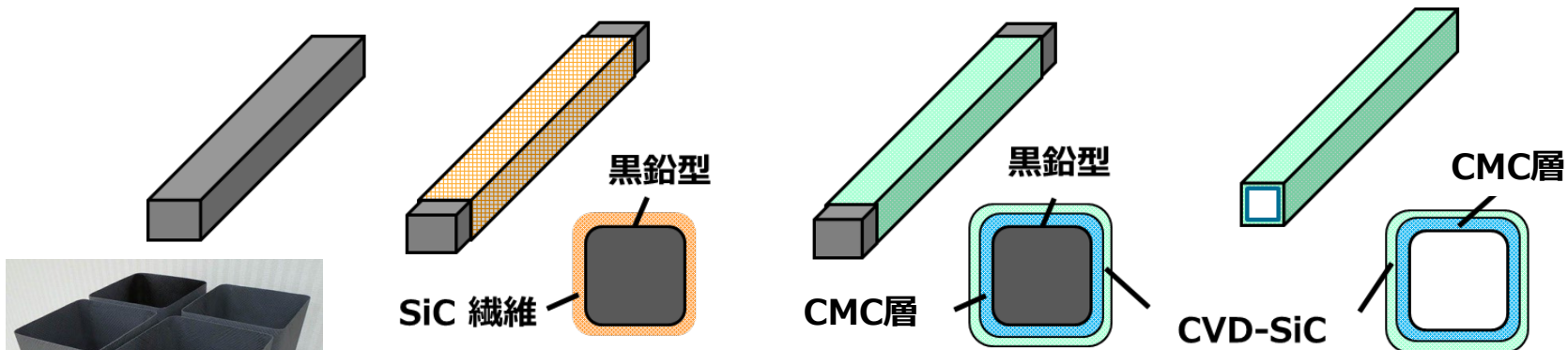
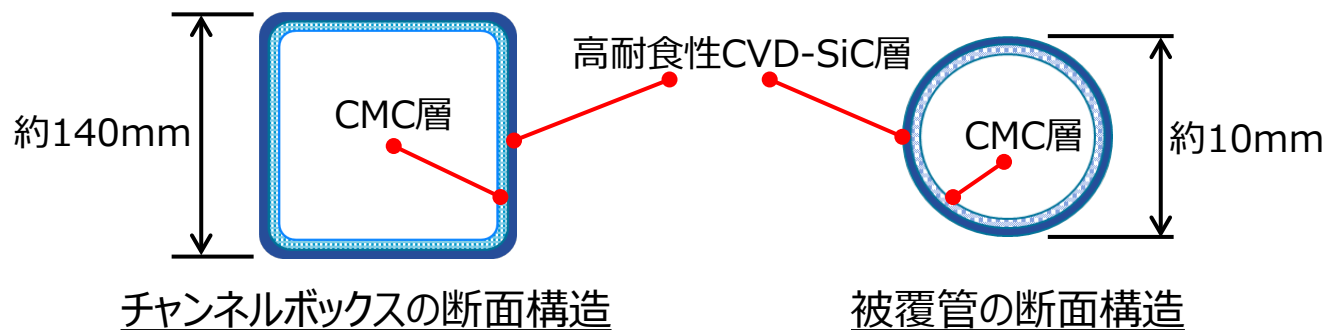
03

➤ 成果概要

- ・SiC複合材の構造と製造方法
- ・主な取得データ
(炉外試験、照射試験(計画含む))

SiC複合材の構造と製造方法

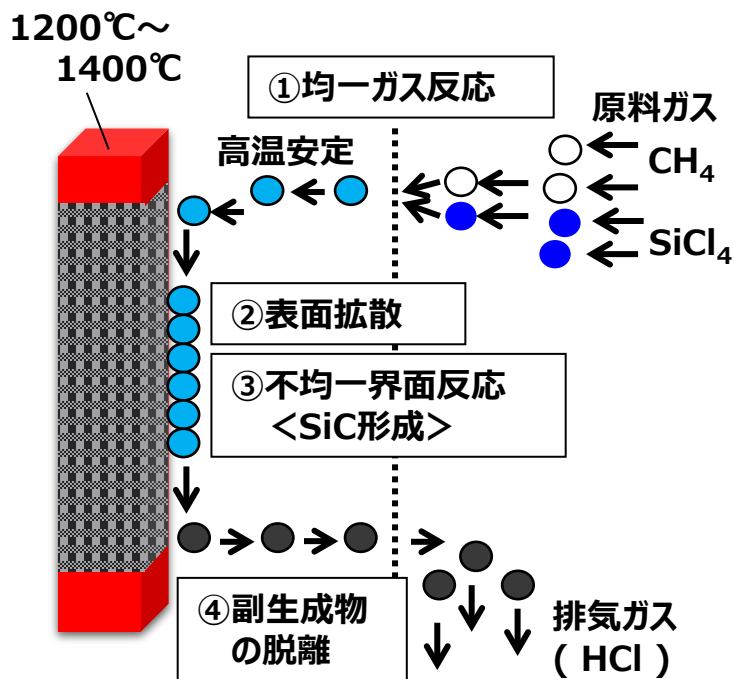
- 外表面を高耐食性CVD-SiC層とすることで耐食性を確保



CVI/CVD法

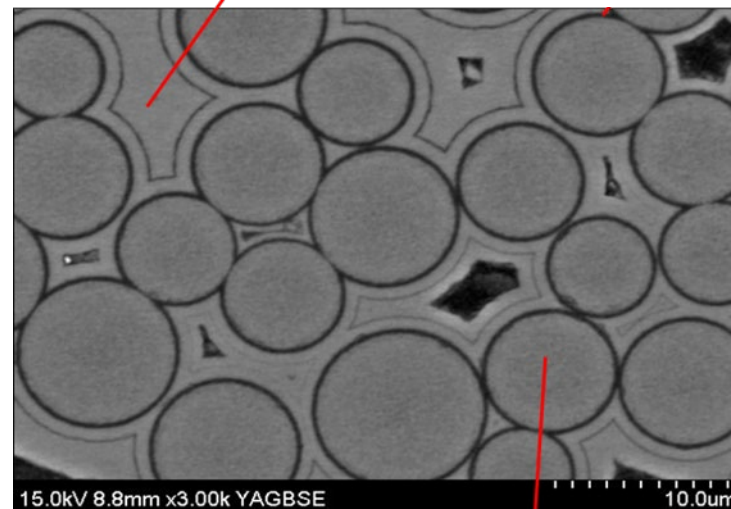
CVI:(化学気相浸透:Chemical Vapor Infiltration)
CVD:(化学気相成長:Chemical Vapor Deposition)

SiC複合材の製造方法



CVI/CVD法の説明

CVI-SiCマトリックス

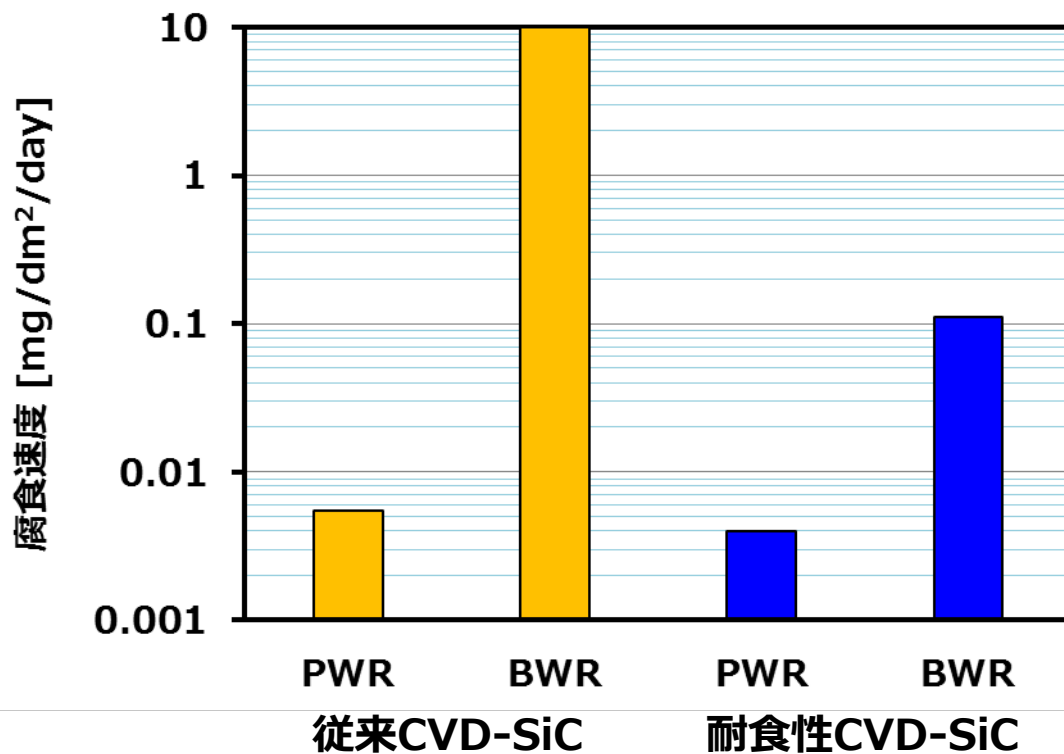


SiC繊維

CMC層断面のSEM観察

耐食性および気密性に最も優れるCVI/CVD法を用いて、SiC炉心材料（チャンネルボックス及び被覆管）の製造プロセス及び製造条件を最適化

耐食性



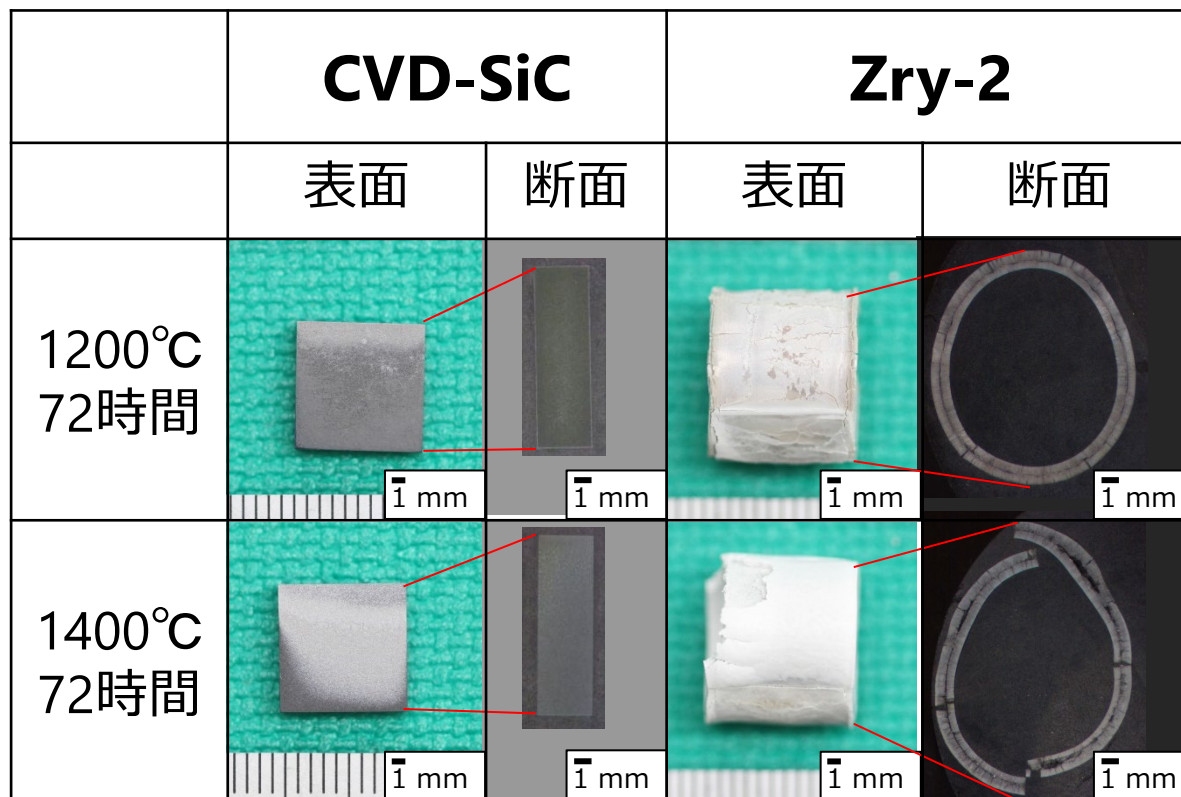
- PWR水質条件
330°C, 18.5MPa
DO 3ppb以下
- BWR水質条件
290°C, 8MPa
DO 8ppm

CVD-SiCの炉外腐食試験結果

PWRおよびBWR水質環境でのCVD-SiCの炉外腐食試験を実施
いずれの水質環境においても良好な耐食性を有するCVD-SiC製造条件を確立

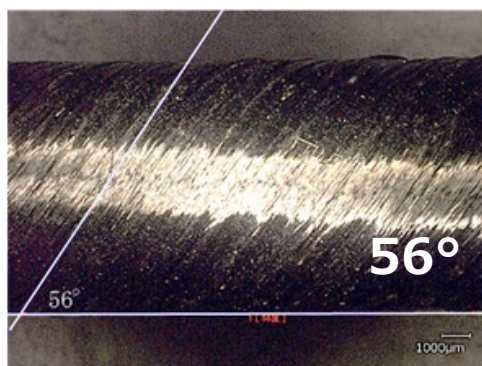
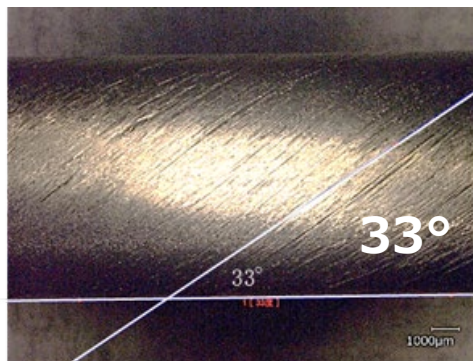
高温水蒸気特性

- 高温水蒸気環境中での腐食特性評価

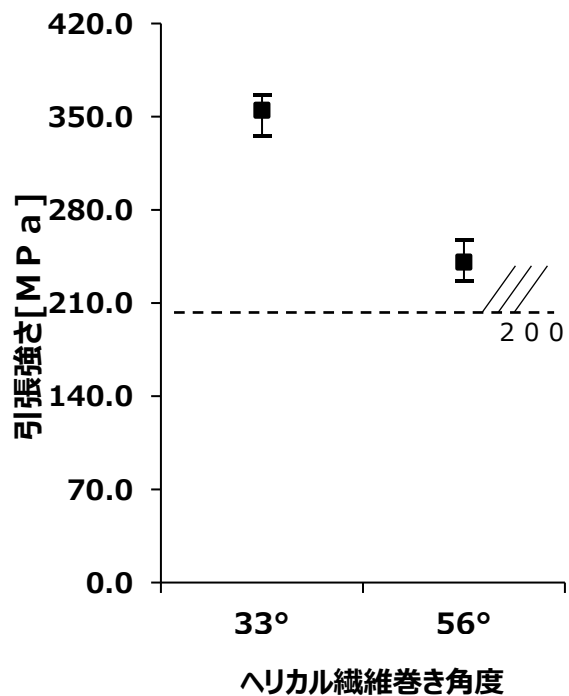


CVD-SiCは、表面にのみ被膜を形成、試料内部は健全
Zry-2は、表面が白色化し、試料内部まで白色化

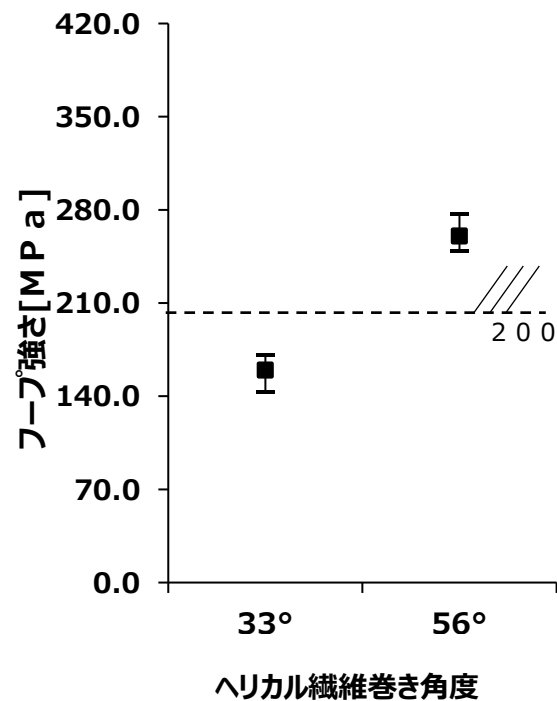
機械的特性



ヘリカル繊維巻き角度



引張強さ

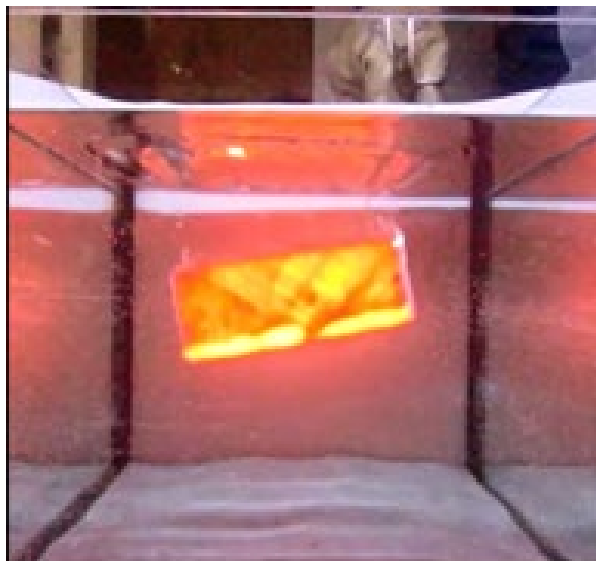


フープ強さ

強度設計は、繊維巻き角度にてコントロール可能であることを確認

SiCチャンネルボックス試験片の熱衝撃試験

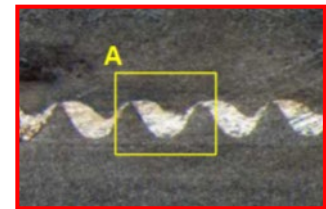
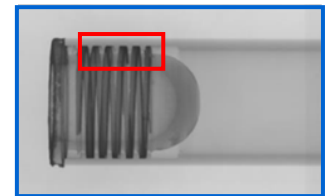
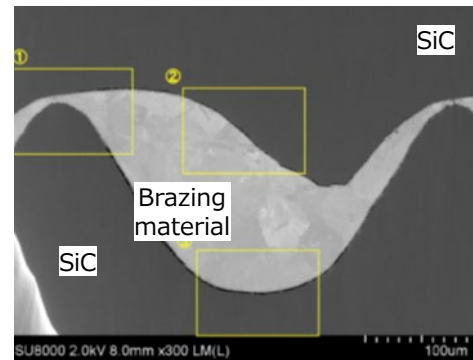
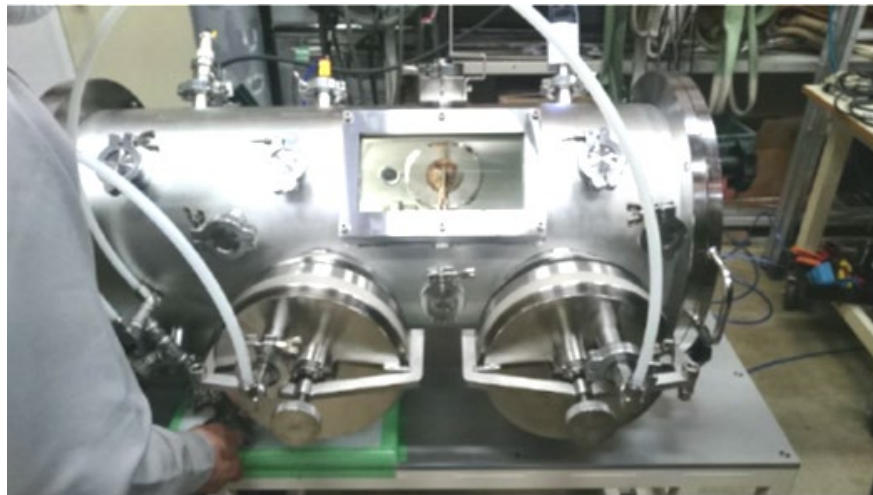
- 試験片サイズ：幅132.5mm × 長さ50mm
- 空気中で1200℃に加熱し、20℃の水中に投下



熱衝撃試験結果

熱衝撃試験後の試験片は形状を維持しており、クラックも認められない

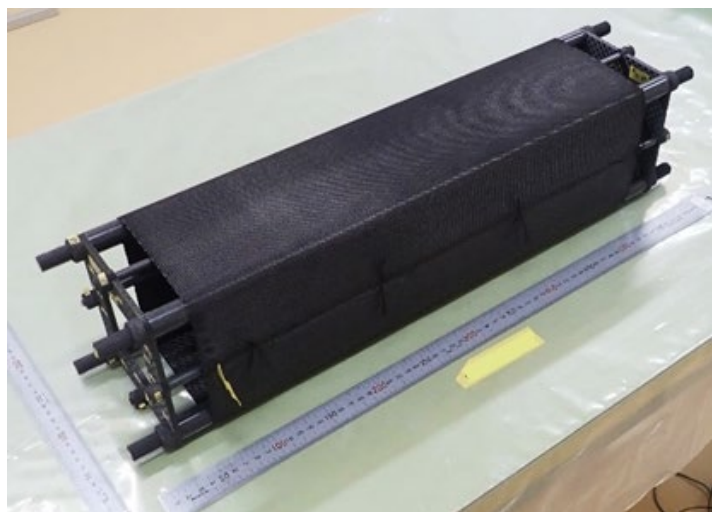
端栓接合技術の高度化



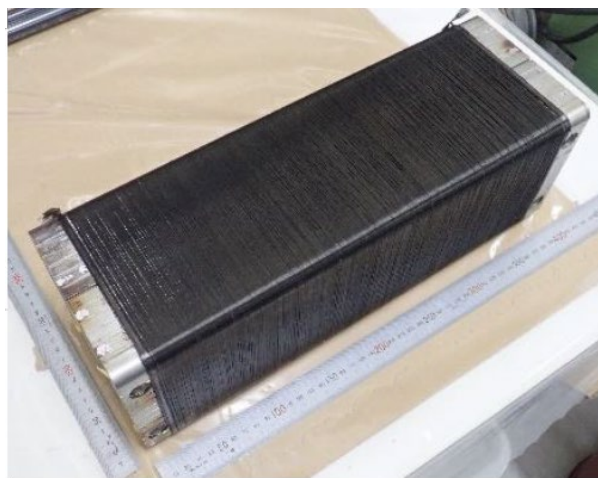
接合部の気密性を評価試験にて確認

He環境下での端栓接合技術を開発
模擬燃料棒作製に向けたプロセス開発を実施

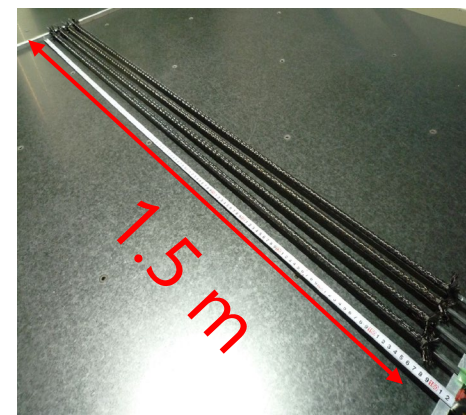
長尺SiC被覆管、チャンネルボックスの製造技術開発



2軸円筒織物試作結果



フィラメントワインディング試作結果



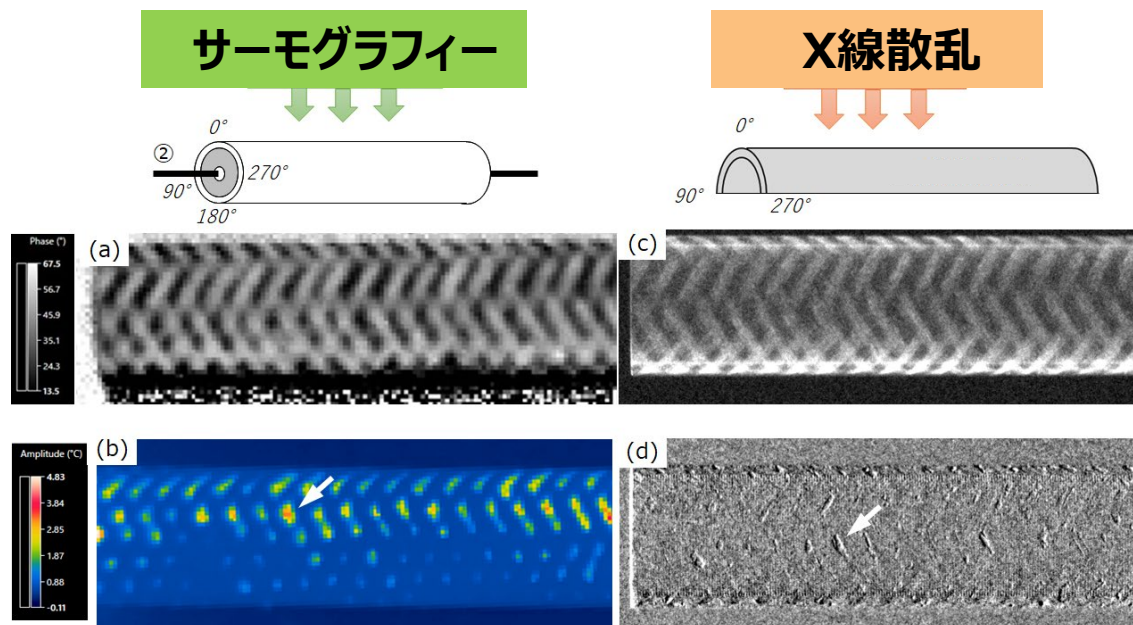
試作した1.5mの
SiC被覆管

1.5m超級のSiC被覆管及びチャンネルボックスを製造可能とする製造プロセス条件の策定を進め、将来的な長尺化に向けた製造上の技術課題を抽出するとともに解決策を確立

製造品質向上のための検査技術開発

候補技術

- X線CT
- X線散乱
- 超音波探傷
- サーモグラフィー
- 渦電流探傷



サーモグラフィーおよびX線散乱による測定の例

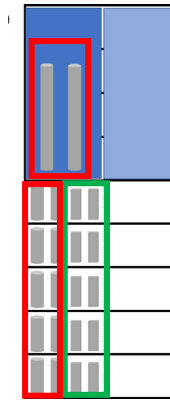
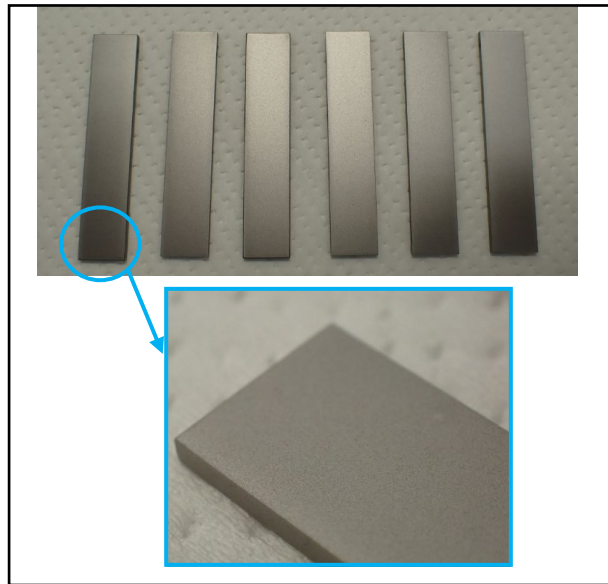
候補技術の調査・選定及び選定技術による微小欠陥検出試験により、各候補技術の欠陥検出能力を把握

照射試験データの取得：MITR試験片照射(BWR条件)

MITR向け管状試験片



MITR向け板材試験片



MITR試験体装荷図

今後のスケジュール

2023/11：米MITに試験体出荷

2024/1~3：MIT照射試験（1サイクル目）

2024/4：1サイクル目試験結果受領

その後も合計4サイクル分の照射試験を予定

2024/1月より照射試験開始予定。試験結果を設計にフィードバックする

04

- **実用化に向けた主な技術課題**
- **まとめ**

実用化に向けた主な技術課題

● 設計技術

- 機器機能要求の具体的なセラミックス複合材設計（マトリクス、繊維、界面）
- セラミックス複合材の評価手法、解析コードの適合性、高度化
- **照射試験、材料特性試験データの拡充、耐食性向上技術**

● 製造技術

- **長尺化製造技術（4 m長のチャンネルボックスと被覆管）**
- 繊維複合化技術、セラミックス加工技術
- **接合技術、気密性確保**

● 検査技術

- 現状の金属材料に対する非破壊検査技術は適用できない
- **セラミックス複合材の欠陥（クラック、気孔）に対する適切な検査方法**

● 許認可・規格基準

- **セラミックスの構造材適用に向けた規格基準への対応**
- LTA装荷のための指針 → 本格利用に向けた審査指針

まとめ

- 東芝エネルギーシステムズは、2000年代半ばからジルカロイ被覆管の代替としてのSiC炉心材料開発に着手。東日本大震災以降、産官学連携で本格的にSiC炉心材料開発に取り組んでいる。
- 耐食性および気密性に優れるCVI/CVD法を用いて、SiC炉心材料の製造プロセス及び製造条件を最適化。
- 実機への適用に向けて、SiC被覆管／チャンネルボックスの長尺製造技術開発を実施中。1.5m超級の製造技術を確立。
- 今後はフルスケール製造技術を確立し、試験・検査技術開発、接合技術開発を進めるとともに、照射試験データを拡充し、2030年代の実用化を目指す。

TOSHIBA

END