

OASIS特別講演会  
平成26年2月28日(金)  
TKPガーデンシティ札幌  
きょうさいサロン“飛鳥”



# INSPIRE計画の概要

*Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System/Material*

*Muroran Institute of Technology*

室蘭工業大学  
環境・エネルギーシステム材料研究機構 (OASIS)

中里 直史

# 発表内容

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

- 背景
- INSPIRE計画とSCARLET計画の比較
- INSPIRE計画の概要
- 中性子照射実験の概要
  - ・ ハルデン炉照射の概要
    - INSPIRE計画
    - SCARLET計画
  - ・ BR2炉照射の概要

# 背景

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

- 福島第一原子力発電所の事故以降、軽水炉の安全性を向上させる革新的な技術開発が強く求められています。
- 安全性の画期的な向上を目指す提案として、燃料被覆管素材をZr合金(ジルカロイ)からセラミック複合材料(SiC/SiC)に変更する概念が近い将来の重要な選択肢として重要視されています。

## ◆ SiC/SiC燃料被覆管開発の一例:

欧米ではCVI法により作製するSiC/SiC燃料被覆管の研究開発

→CVI法は緻密性、大型成型性、経済性に課題

→SiC/SiC単体の被覆管ではなく、金属管とSiC/SiC管を組み合わせたハイブリット構造を検討

## ◆ NITE法

緻密なマトリクス形成、大型成型性、経済性等に優れる

→構造用複合材料製造技術として実用化が期待されており、SiC/SiC単体の燃料被覆管作製技術としても有力。

- NITE法により作製したSiC/SiC管の燃料被覆管への適用性検討が必要
- 特に燃料装荷したSiC/SiC被覆管の原子炉環境下での中性子照射試験による耐環境評価が重要

→INSPIRE計画での最重要課題

# INSPIRE計画とSCARLET計画の比較

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

|                        | INSPIRE                    | SCARLET                                   |
|------------------------|----------------------------|---|
| 主目的                    | SiC/SiC燃料被覆管の<br>中性子照射効果研究 | SiC/SiC燃料被覆管の<br>量産基盤技術開発                 |
| 中間素材                   | プリプレグシート                   | プリコンポジットリボン<br>(PCR)                      |
| プリフォーム作製               | ハンドメイド                     | 巻取装置を使用した<br>フィラメントワインディング                |
| 構造                     | SiC/SiC複合材料の<br>単層構造       | 内側/外側をSiCとし中心部は<br>SiC/SiC複合材料とする<br>3層構造 |
| 照射試験時の被覆管中の<br>燃料装荷の有無 | 燃料装荷                       | 燃料非装荷                                     |
| 対象とする炉型                | BWR                        | PWR                                       |

# INSPIRE計画の概要

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

- 経済産業省  
平成24年度革新的実用原子力技術開発補助事業  
「革新的安全性向上を実現させるセラミック複合材料  
の燃料集合体への適用技術開発」  
**INSPIRE計画**  
(**Innovative SiC Fuel-Pin Research**)
- 実施期間:平成24年度～平成28年度 (5年計画)
- 予算:4.5億円
- プロジェクト代表:香山 晃

# 開発課題

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 1: 寸法精度

プロセス最適化により最終加工の要求仕様を緩和し、コストの低減と大量生産に適合する技術統合を目指します。

## 2: 気密特性

プロセス最適化により炉内装荷のための要求仕様を満たし、コストの低減と大量生産に適合する技術統合を目指します。

## 3: 基本強度特性

プロセス最適化を通して過剰特性値を排除し、コストの低減と大量生産に適合する技術統合を目指します。

## 4: 耐環境特性

最外層構造の最適化を通して耐酸化性やLOCA耐性の仕様を満たすプロセスの改善を行います。

燃料装荷した燃料ピン要素部材を用い、ハルデン炉における照射試験により原子炉運転中に燃料棒内で生じる現象の確認を行います。

(本計画は10GWd/t程度の燃焼度まで)

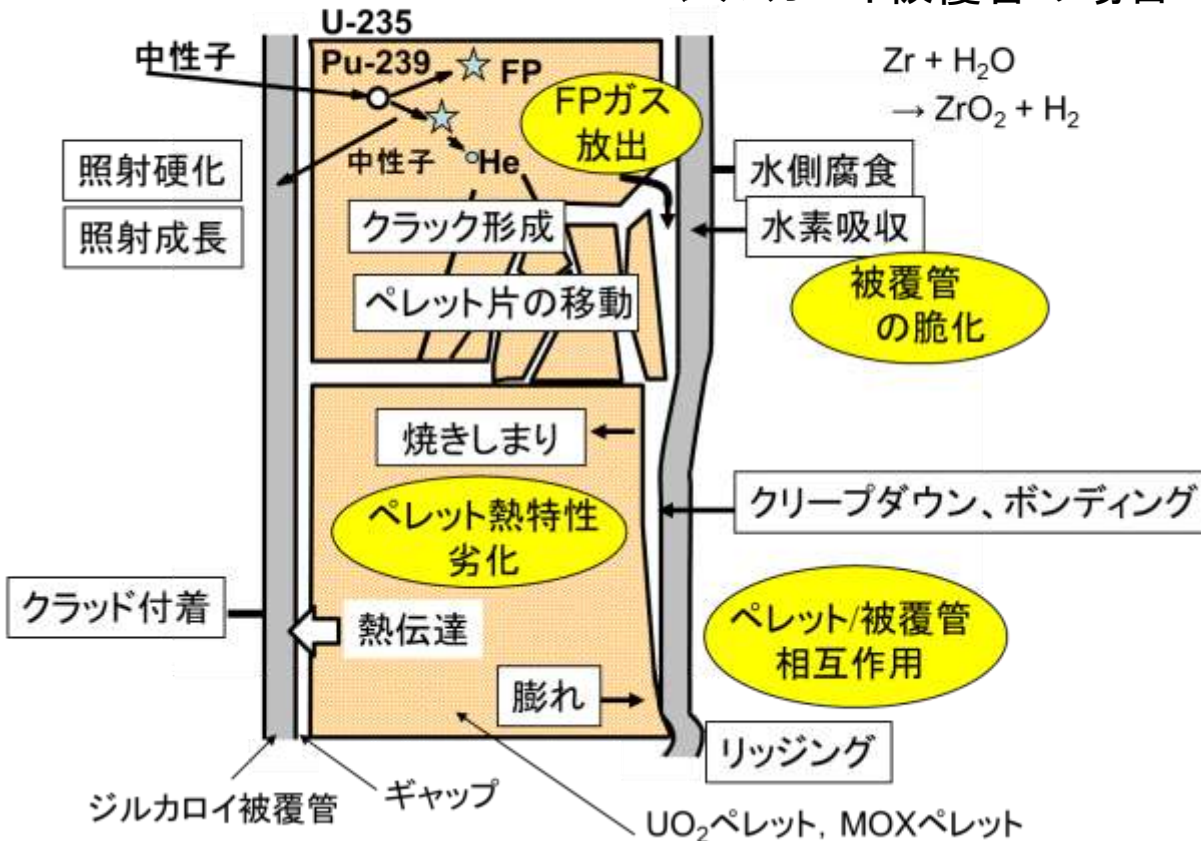
# 原子炉運転中に燃料棒内で生じる現象

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 原子炉運転中に燃料棒内で生じる現象

ジルカロイ被覆管の場合



中村仁一氏 (JAEA) 資料による

燃料未装荷被覆管の照射:  
被覆管の照射効果  
被覆管の冷却水共存性  
被覆管のクリープ特性  
etc.

燃料装荷被覆管の照射:  
被覆管の照射効果  
被覆管の冷却水共存性  
被覆管のクリープ特性  
燃料の照射効果  
FPガスの放出による内圧変化  
熱伝達変化  
ペレット/被覆管の相互作用  
etc.

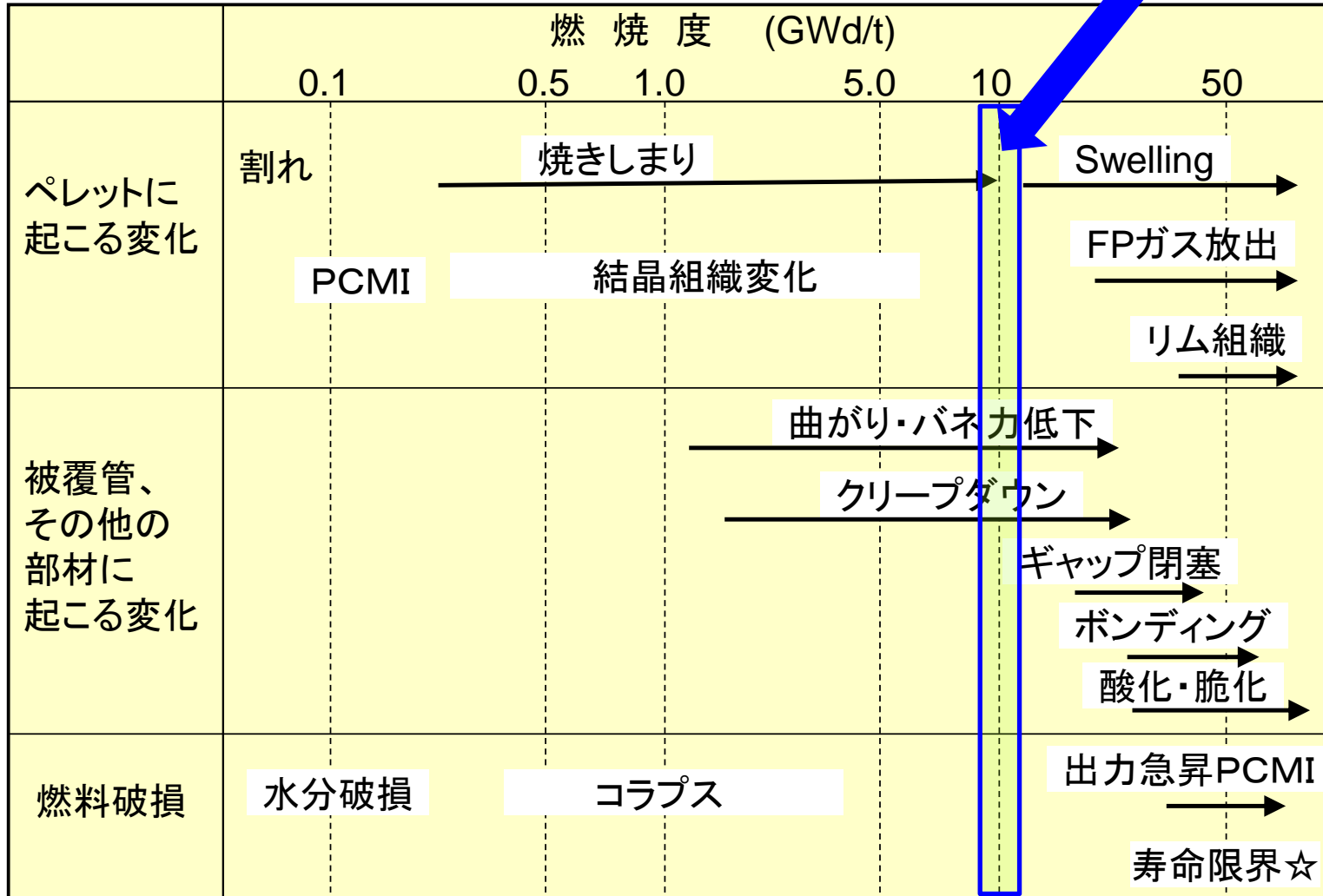
→ 新たな素材の燃料被覆管への適用性を検討するためには、燃料を装荷した照射試験が必要不可欠

# 燃料入り被覆管照射の位置付け

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 本計画の目標



中村仁一氏 (JAEA) 資料による



# INSPIRE計画の目的

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

目的;

軽水炉に革新的な安全性向上をもたらすセラミック複合材料の燃料集合体への適用技術開発を行うことです。

1. これまでに構築されてきたNITE法による燃料被覆管の製造技術を基礎として、BWR用の燃料集合体やチャンネルボックスを作成するための技術統合を行います。この技術によって製作された燃料入りの燃料ピン要素(実用寸法よりは短いもの)がBWR水環境下での中性子照射において健全性を維持していることを確認し、将来のシビアアクシデントを含む実用シナリオにおいても十分な安全性を担保できることを明らかにします。
2. この為に、現状で最も短期間に信頼性の高い研究を遂行できるノルウェーのハルデン炉とベルギーのBR2炉で中性子照射研究を行うことを中核とします。

- セラミック燃料ピン要素の製造技術開発と技術統合
- セラミック燃料ピン要素の中性子照射下健全性
- セラミックス燃料ピン素材の中性子照射効果

# 実施体制

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Mitsubishi Institute of Technology

室蘭工業大学

セラミック燃料ピン要素の製造技術  
開発と技術統合

セラミック燃料ピン要素の中性子照  
射下健全性

- 照射後試験(於ハルデン)
- セラミック燃料ピン素材の中性子照  
射効果
- 照射後試験(於東北大学)

(外注)

ハルデン原子炉

セラミック燃料ピン要素の中性子照射下健全性

- キャプセル仕様
- キャプセル装荷
- 中性子照射
- 照射後試験(於ハルデン)

(外注)

東北大学

セラミック燃料ピン要素の中性子照射下健全性

- 端栓溶接技術検討
- セラミック燃料ピン素材の中性子照射効果
- 照射試験準備

(外注)

NFD

セラミック燃料ピン要素の中性子照射下健全性

- 照射後試験 *今年度は外注中止*

(外注)

ZRT

セラミック燃料ピン要素の中性子照射下健全性

- 照射試験準備

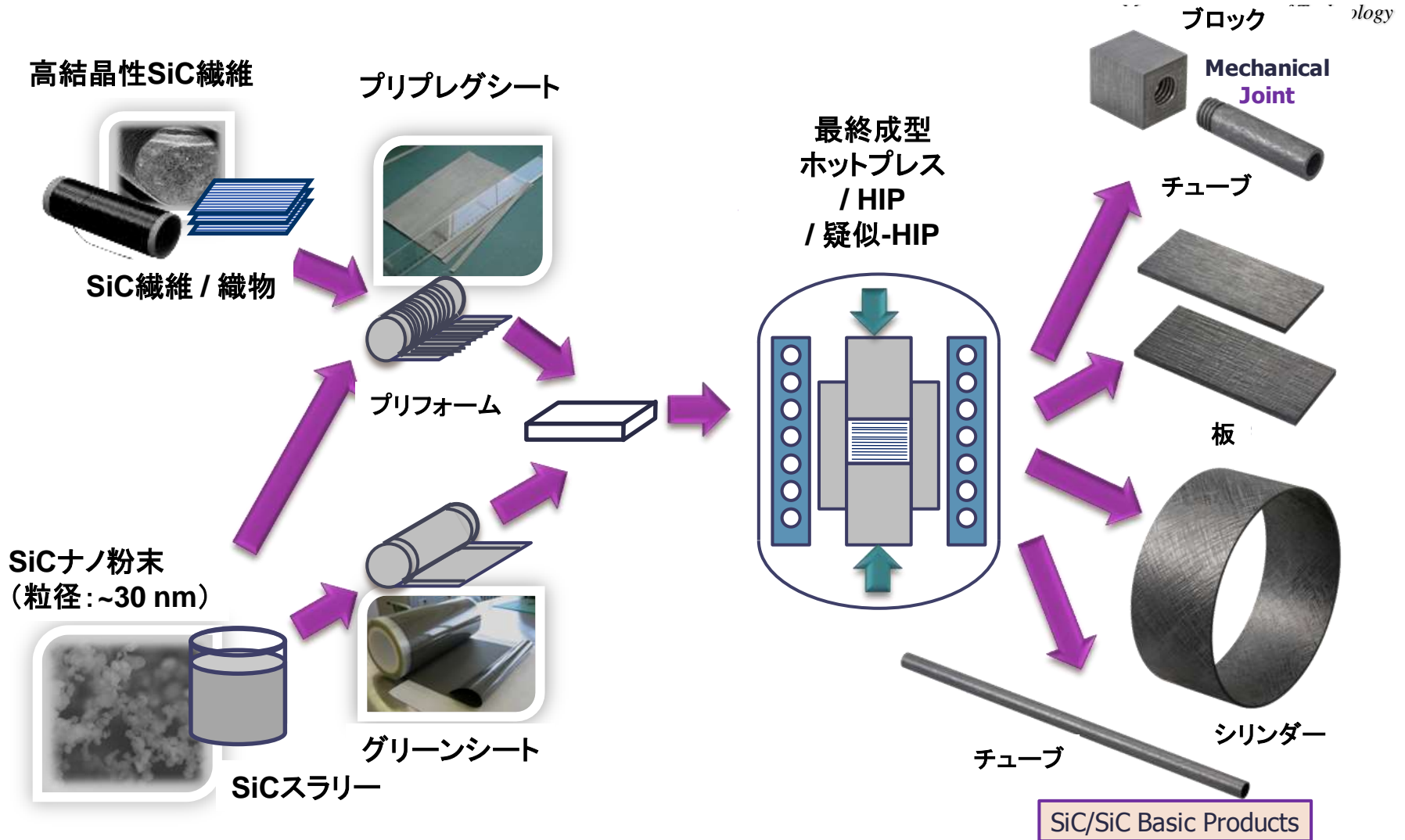
# 実施スケジュール

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

| 技術課題                                | 平成24年度            | 平成25年度            | 平成26年度           | 平成27年度        | 平成28年度    |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------|-----------|
| (1) セラミック燃料<br>ピン要素の製造技術<br>開発と技術統合 | 被覆管製作             | 被覆管製作             | 被覆管製作            | 被覆管製作         | 燃料被覆管製作   |
|                                     |                   | 被覆管予備<br>評価試験     | 被覆管予備<br>評価試験    | 被覆管予備<br>評価試験 | 照射材PIE    |
|                                     | BR2炉用試料製作         | BR2炉用試料作製         | 非照射材試験用<br>試験片製作 | 非照射材評価        |           |
|                                     |                   | ロッド製作             | 水蒸気反応<br>評価装置製作  | 水蒸気反応評価       |           |
|                                     |                   |                   |                  |               |           |
| (2) セラミック燃料<br>ピン要素の中性子<br>照射下健全性   | 仕様策定<br>キャプセル設計   | キャプセル製作           | ハルデン炉<br>照射実験    | ハルデン炉<br>照射実験 | 照射材PIE    |
|                                     |                   |                   |                  | 照射材<br>輸送     |           |
| (3) セラミック燃料<br>ピン素材の中性子<br>照射効果     | BR2 照射<br>キャプセル製作 | BR2 照射<br>キャプセル製作 |                  |               |           |
|                                     |                   |                   | BR2炉照射材評価        |               |           |
|                                     |                   |                   | 照射材輸送            | 照射材輸送         | 照射材PIE    |
|                                     |                   | (BR2 照射)          | (BR2 照射)         |               | 研究<br>まとめ |

# 本計画で用いるNITE法の概要

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material



- 量産化に向け開発した乾式の間素材(グリーンシート、プリプレグシート)の使用が特徴

# Halden炉照射の概要 (INSPIRE)

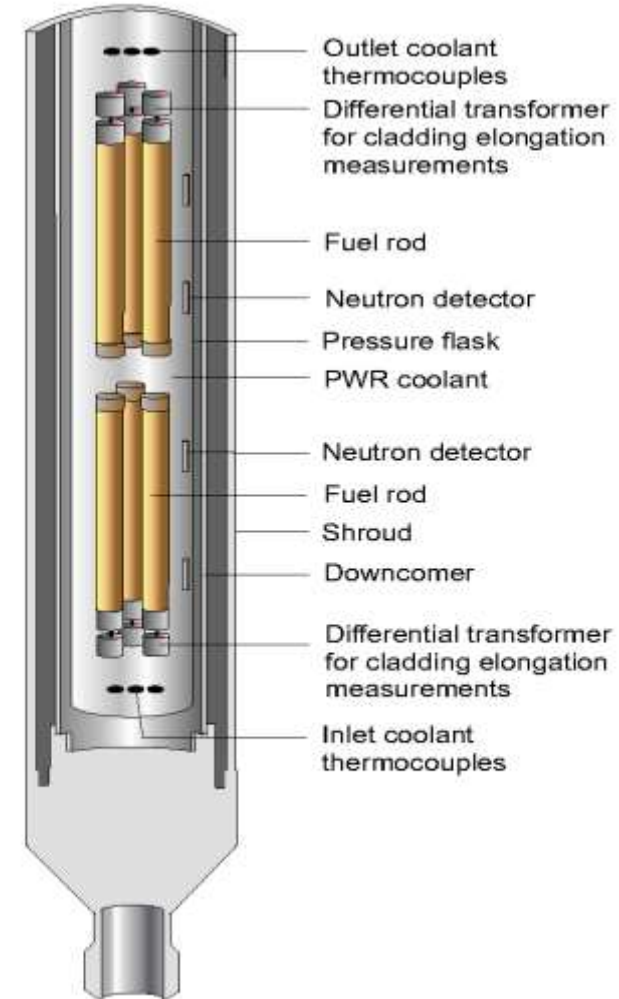
Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

|       |  |
|-------|--|
| 試験リグ  | 核燃料装荷SiC/SiCロッド×4<br>核燃料装荷ジルカロイロッド×1<br>核燃料非装荷SiC/SiCロッド×1                                   |
| 試験ロッド | 両端封止SiC/SiC管<br>端栓、材質などの異なるものを用意<br>UO <sub>2</sub> 燃料を装荷<br>伸び計 (on-lineでPCMI測定および被覆管変形量測定) |
| 運転条件  | BWR条件<br>温度: 286°C、圧力: 7 MPa   |
| 期間    | 3ハルデン炉サイクル(全出力運転120-150日)  |
| 燃焼度   | 10 GWd/t(予定)   |

## 進行状況:

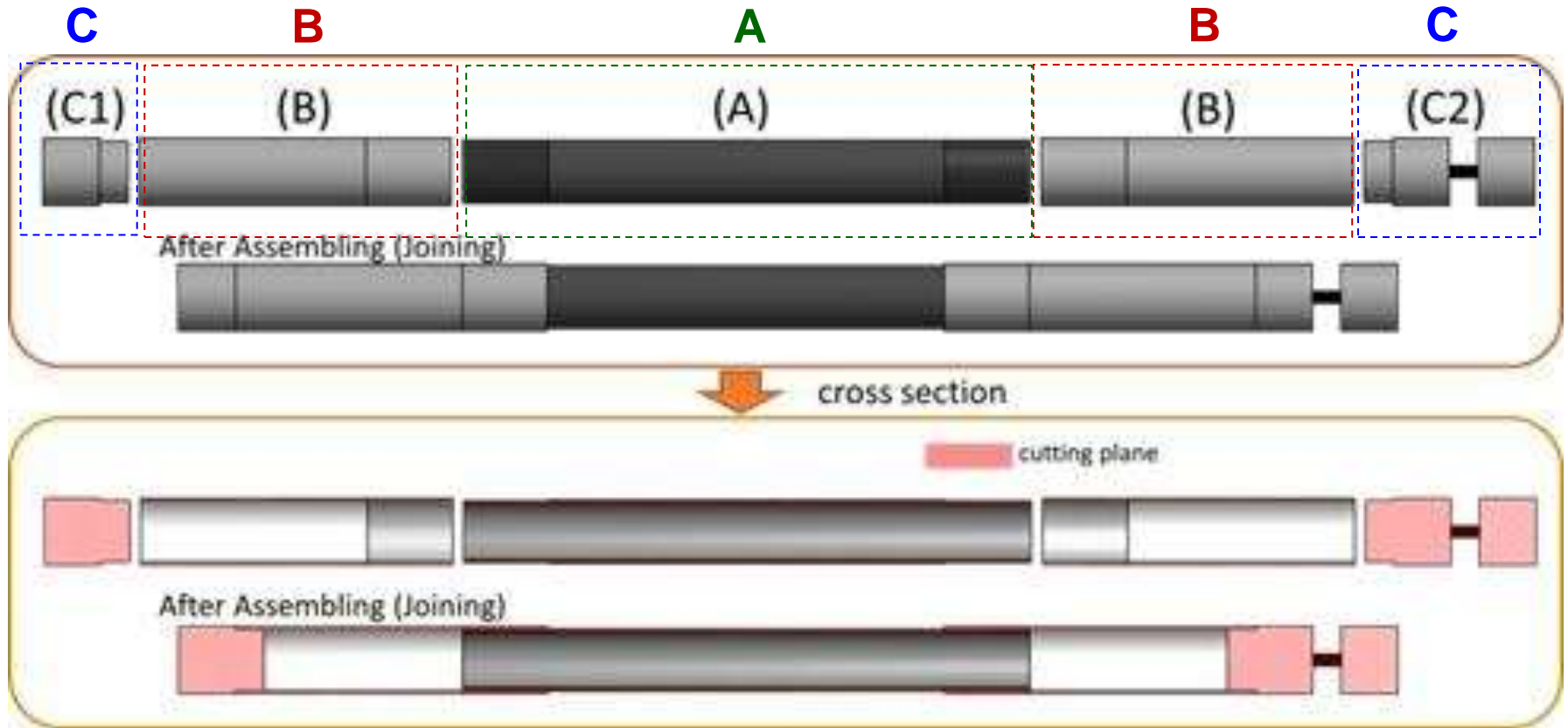
- ✓ SiC試験ロッドの基本設計及びテストマトリックスを決定(2013年11月)
- 照射キャプセルの設計・作製中
- SiC試験ロッド作製のための技術検討



# SiC試験ロッドの基本図面 (INSPIRE)

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology



## SiC試験ロッド構成要素

A: SiC/SiC管 (担当: 室蘭工業大学)

B: ジルカロイ管 (担当: 室蘭工業大学)

C: 端栓部 (担当: Halden)

- 試験ロッドの全長350mm、SiC/SiC部は200mmを予定しています。

# ジルカロイ管との接合検討

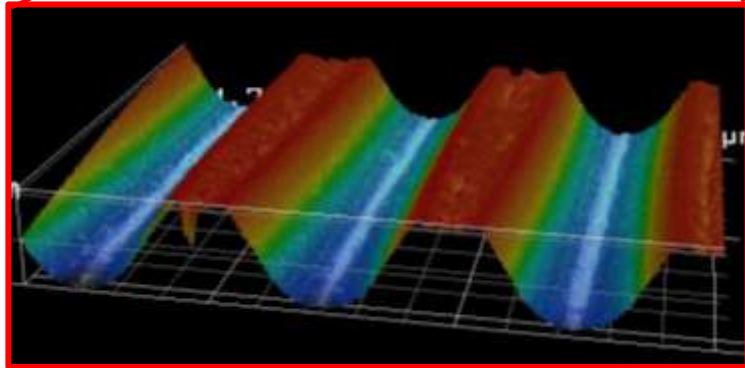
Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

SiC/SiC管



ネジ部の3D画像



ジルカロイ管



+



ネジ接続



- 薄肉のSiC/SiC管への高さ $140\ \mu\text{m}$ 、ピッチ $280\ \mu\text{m}$ のネジ山加工に成功しています。
- 接合部の気密性を確保するためにネジ接合と併用して、溶接による接合も検討しています。

# BR2炉照射の概要

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 2013年度照射試験の概要

---

|         |   |
|---------|---|
| 照射キャプセル | BAMI  |
| 照射試料    | 量産型NITE-SiC/SiC複合材料(クーポン試験片)  |
| 照射条件    | 温度:<100°C<br>雰囲気:水環境中<br>中性子フルエンス: $2 \times 10^{24}$ n/m <sup>2</sup><br>SiC/SiC複合材料の推定損傷量:0.2 dpa |

---

- 東北大学大洗施設にて一部の試料に対し照射後試験を実施しています。

## 2014年度照射試験の概要

---

|         |  |
|---------|--|
| 照射キャプセル | CALLISTO   |
| 照射試料    | 量産型NITE-SiC/SiC複合材料(クーポン試験片)   |
| 照射条件    | 温度:290°C<br>雰囲気:ヘリウム雰囲気中<br>中性子フルエンス: $1 \times 10^{24}$ n/m <sup>2</sup><br>SiC/SiC複合材料の推定損傷量:0.1 dpa |

---

- 2014年2月、試料を東北大学大洗施設へ提出し、照射試験に向けた準備が進行中です。



# INSPIRE計画のこれまでの成果

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 寸法精度:

外径・内径:  $\pm 0.05\text{mm}$  真直性: 1/1200 肉厚:  $\pm 10\%$  真円度: 1/2000

特注品の精密加工用ダイスの使用により実現

より簡易な加工での目標値の達成か要求性能の緩和による目標達成の検討

## 気密特性:

Heリーク特性:  $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (ハルデン炉装荷のための要求値)

SiC/SiC管のHeリーク特性:  $1 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (一部の試料)

SiC/SiC管/ジルカロイ管接合部試作管のHeリーク特性:  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

要求値より低いHeリーク特性を有する管を作製

要求値を満たす管を安定して作製可能な技術の検討

接合部の気密性を向上させる接合技術の検討

# INSPIRE計画のこれまでの成果

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

Muroran Institute of Technology

## 基本強度特性:

軸方向引張強度: 300MPa

フープ強度: 100MPa(圧縮)、300MPa(引っ張り)

事故時における破損: 貫通性損傷が系統的に生じないこと(0.2%の擬延性)

**同等の板材での試験では目標値を達成。**

*被覆管を用いるOEB試験やその他の強度評価による特性確認*

## 耐環境特性:

炉外酸化試験、LOCA模擬試験: ジルカロイ管同等以上の特性

耐中性子照射特性:

1) Halden炉での燃料入り密封被覆管試料照射での健全性確認

**ジルカロイ端栓での封止技術の基礎検討を完了。**

*ハルデン炉用の燃料ピン要素部材作製のための技術検討*

2) BR2炉での中性子照射による特性変化の確認(±5%以内)

**照射後においても照射前と同様の強度を有していることを確認**

# まとめ

Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System / Material

- INSPIRE計画は燃料を装荷した燃料ピン要素部材の中性子照射研究を中核とすることで、SiC/SiC燃料棒の振舞いや、ジルカロイとの挙動の違いを現実に近い形で洗い出し、SiCを使って近い将来の原子力の安全性向上に寄与しうる条件を整える計画です。
- 計画は概ね順調に進んでおり、来年度予定しているハルデン炉での照射に向けて、炉内へ装荷するための要求項目を満たすような燃料ピン要素部材作製に向けた技術検討を進めています。
- OASISではINSPIRE計画により沸騰水型軽水炉環境下でのSiC/SiC複合材料の照射効果、およびに燃料ピンとしたときのSiC/SiCの挙動情報を直接的な実験により収集し、原子力安全に寄与するためのSiC/SiC材料のデータ蓄積を急ピッチで進めています。