

# 国内のATF研究開発概要

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
山下 真一郎

## 1. はじめに

- ✓ 事故耐性燃料（ATF）開発の経緯

## 2. 国内におけるATF研究開発の全体像

- ✓ エネ庁事業で開発中のATFとその開発推進体制
- ✓ ATFの実用化までの流れ・開発ステップ
- ✓ ATF研究開発の加速化に向けたJAEAの基本的考え方
- ✓ ATF研究開発における課題へのJAEAの取り組み
  - 連携協力体制の構築
  - 米国試験炉での照射試験の実現
  - 基礎基盤研究の推進

## 3. ATF早期導入に向けた取組みと基礎基盤研究の役割

## 4. 各ATF候補材開発の取組みの現状

## 1. はじめに

- ✓ 事故耐性燃料（ATF）開発の経緯

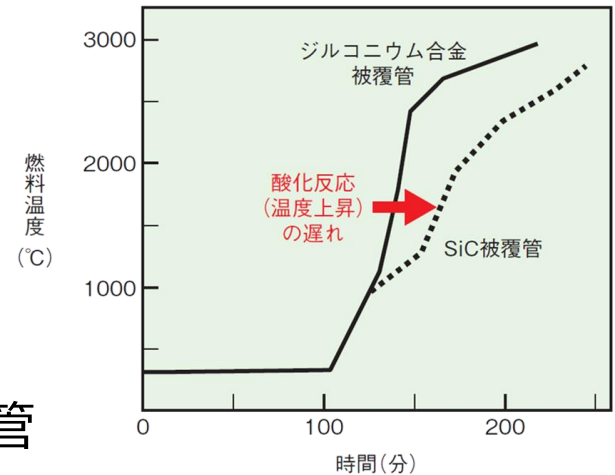
## 2. 国内におけるATF研究開発の全体像

- ✓ エネルギー事業で開発中のATFとその開発推進体制
- ✓ ATFの実用化までの流れ・開発ステップ
- ✓ ATF研究開発の加速化に向けたJAEAの基本的考え方
- ✓ ATF研究開発における課題へのJAEAの取り組み
  - 連携協力体制の構築
  - 米国試験炉での照射試験の実現
  - 基礎基盤研究の推進

## 3. ATF早期導入に向けた取組みと基礎基盤研究の役割

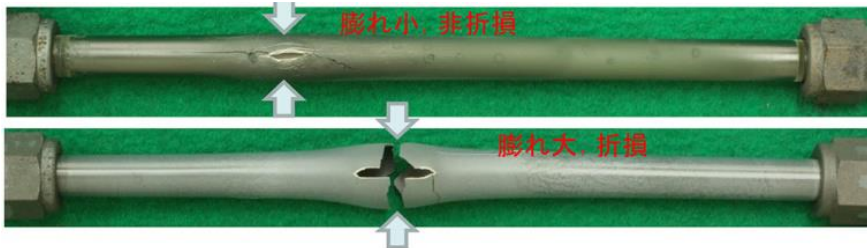
## 4. 各ATF候補材開発の取組みの現状

- 福島第一原発事故：ジルコニウム合金（ジルカロイ：Zry）被覆管酸化による温度急昇と水素発生・爆発
- 酸化抑制による温度急昇と水素発生抑制・緩和  
⇒事故への対処時間延伸
- 「燃料・材料」からの対応：
  - Crコーティング、改良ステンレス鋼等の新材料被覆管
  - 新材料被覆管に対応した燃料（ペレット）
- 現行商用軽水炉への出来るだけ早期実装を目指した開発
- 現行燃料（ $UO_2$ ペレット、Zry被覆管燃料）と同等以上の性能も追求



図：酸化反応が進行した時の燃料温度の上昇と時間の関係を示した模式図

[https://rdreview.jaea.go.jp/review\\_jp/2016/j2016\\_4\\_10.html](https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2016/j2016_4_10.html)



LOCA模擬試験後の外観  
上：コーティングあり  
下：コーティングなし



写真：SiC/SiC複合材料で製作されたBWR用チャンネルボックス

三菱重工技報 Vol.57 No.4 (2020)  
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574110.pdf>

東芝レビュー Vol. 75 No. 2 (2020年3月)  
[https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/02/75\\_02pdf/3-20200301.pdf](https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/02/75_02pdf/3-20200301.pdf)

## 1. はじめに

- ✓ 事故耐性燃料（ATF）開発の経緯

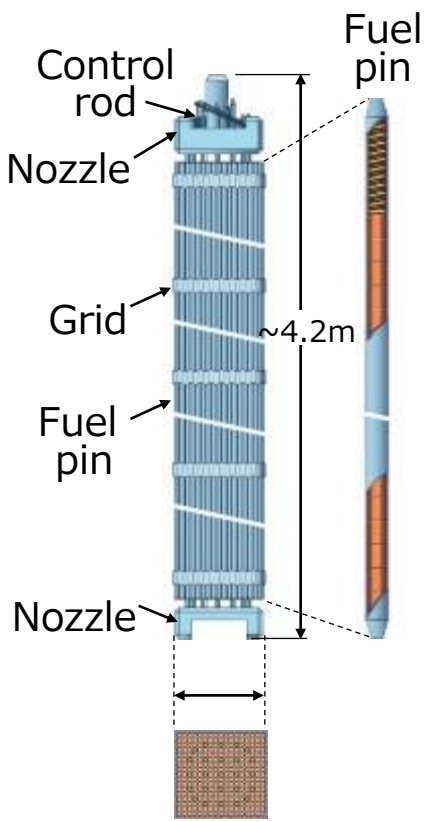
## 2. 国内におけるATF研究開発の全体像

- ✓ エネ庁事業で開発中のATFとその開発推進体制
- ✓ ATFの実用化までの流れ・開発ステップ
- ✓ ATF研究開発の加速化に向けたJAEAの基本的考え方
- ✓ ATF研究開発における課題へのJAEAの取り組み
  - 連携協力体制の構築
  - 米国試験炉での照射試験の実現
  - 基礎基盤研究の推進

## 3. ATF早期導入に向けた取組みと基礎基盤研究の役割

## 4. 各ATF候補材開発の取組みの現状

既存のジルカロイ（Zry）被覆管燃料に比べて、**安全性の大幅な向上**が見込まれる事故耐性燃料（ATF）の開発が以下の体制で進められている。



PWR 燃料集合体

## ATF候補材料と開発体制

### 【 SiC/SiC複合材の開発 】

- 開発対象：BWR及びPWR用燃料被覆管  
BWR用チャンネルボックス  
開発主体：東芝ESS

- 開発対象：BWR用燃料被覆管  
開発主体：日立GE/GNF-J

### 【 FeCrAl-ODS(改良ステンレス鋼)の開発 】

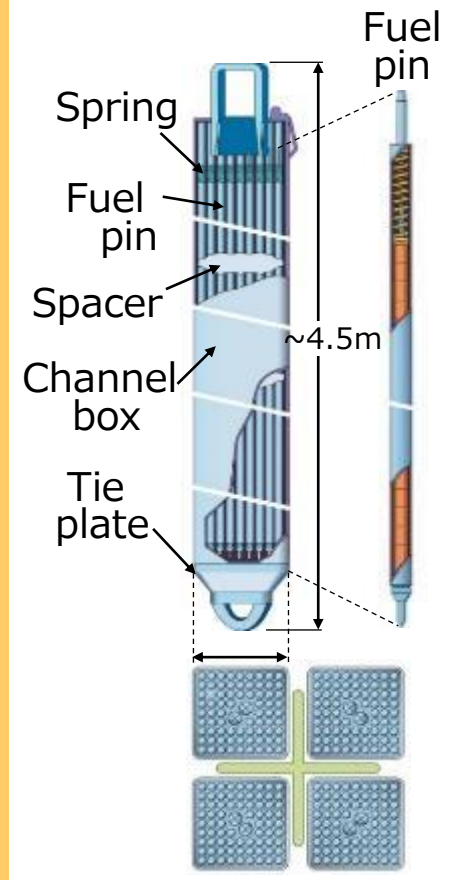
- 開発対象：BWR用燃料被覆管  
開発主体：日立GE/GNF-J(+NFD)

### 【 Cr coated-Zryの開発 】

- 開発対象：PWR用燃料被覆管  
開発主体：MHI/MNF

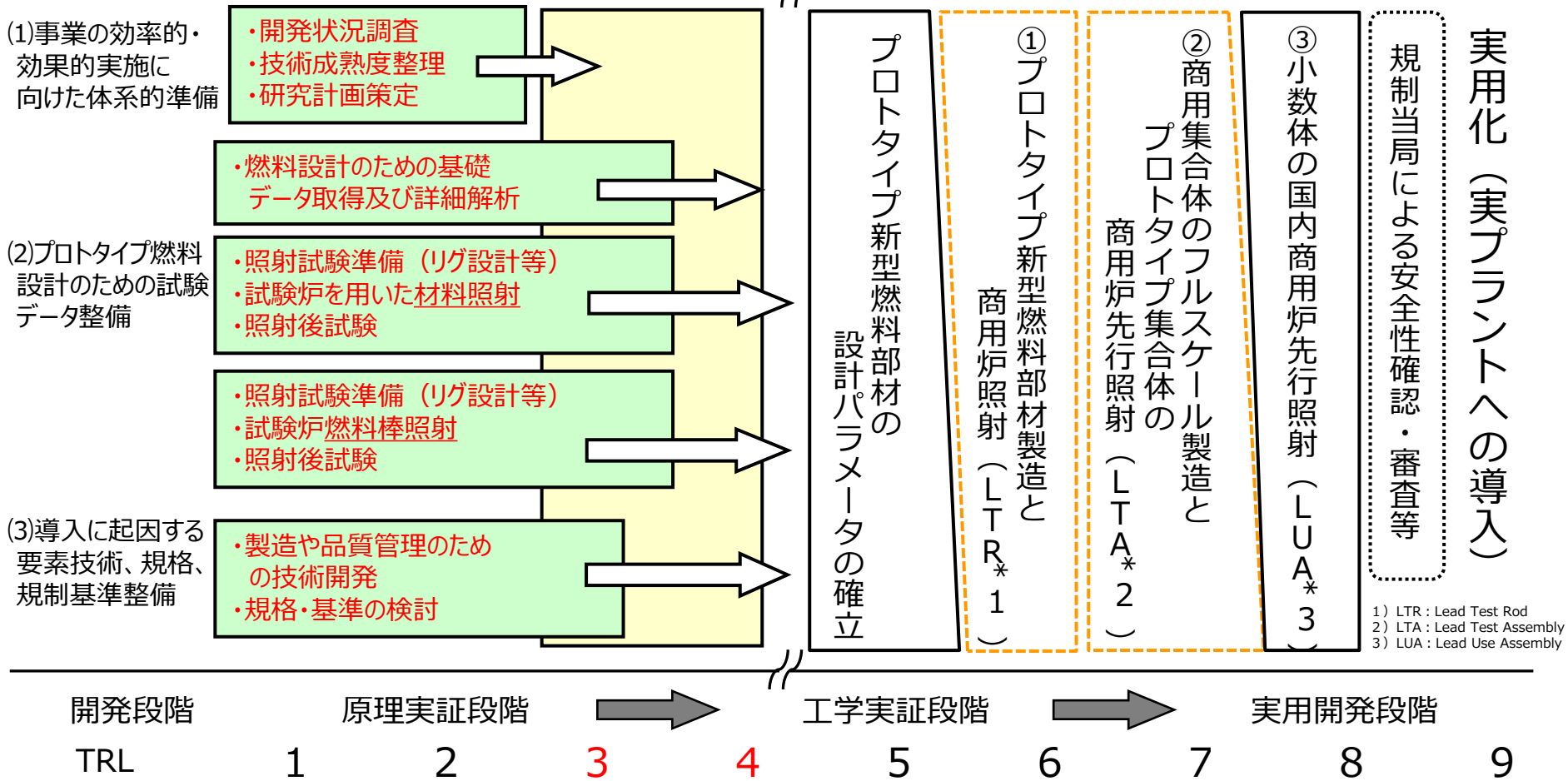
### 【 ATF共通基盤技術開発、事業者間の連携推進 】

- 検討事項：代替照射技術開発、長期ふるまい予測手法開発、事故時挙動評価手法開発、海外炉照射試験、等  
実施主体：JAEA



BWR燃料集合体

注) 国内では、事故耐性制御棒(ATCR)の開発も進められている



- 既存軽水炉を含めた革新的原子炉の照射下燃料・材料ふるまい評価技術（通常運転時～過渡時までを含む）を開発して事故耐性燃料（ATF）のふるまいを解き明かし、
- 許認可アカウントビリティ向上、人材育成等に貢献しながら、ATF早期実用化を万全のものとする。
- 開発した技術を改良・拡張し、後続のATFや新型被覆管へ適用することにより、ATFの実用化加速を後押しする



## 【国内のATF研究開発初期の状況、直面していた課題】

- 民間事業者は個々のATF概念を個別提案、電気事業者は再稼働が第一優先でATF等新型燃料開発への関心度は低く、関わりは情報収集・情報交換程度
- JMTRやハルデン炉等利用可能な照射試験炉の相次ぐ廃炉、照射場・照射機会の著しい減少、照射インフラのニーズ拡大・競争激化
- 海外での先行事例や工学的判断等に基づく、必要最小限の条件範囲での試験データ取得

## 【課題解決に向けたJAEAの取り組み】

- ① 連携協力体制の構築：  
関係性が乏しかった、**電気事業者との間に信頼関係を醸成、国内の中立的な原子力研究機関**
- ② 米国試験炉での照射試験の実現：  
**国立研究機関としての信頼に基づく協力チャンネルの提供、利用機会の拡大**
- ③ 基礎基盤研究の推進：  
**JAEAの専門性、知識・経験に基づき整備した、試験技術や解析コード等によるATF実用化の加速**

- 電気事業者-ATF開発メーカー-JAEAが有機的に連携協力する枠組みとして**連携協議体**を2019年度 (\*1) に構築。
- 年度計画、中間進捗状況、計画達成状況等の情報を共有し、エンドユーザである**電気事業者からのコメントや意見を計画等にフィードバック**。
- JAEAは、**連携協議体をファシリテートし技術成熟度 (TRL) や開発ロードマップ等を纏めるとともに、TRLの技術評価において第3者的立場から妥当性を評価**。



- ATENA (\*2) 内に設けられた事故耐性燃料に関するワーキンググループ (ATF-WG) に参画し技術検討等を実施
- 原子力規制委員会や経済産業省資源エネルギー庁等のステイクホルダとの対話

➡ 事業者から、早期に少数体先行照射を国内で行い、速やかにATFの本格導入の検討を進めたい旨意思表明あり

### ATF導入に向けた事業者の進め方

4

- ✓ 過去に55GWd/t燃料を導入した際、試験照射炉において照射を実施後、安全影響等をまとめた報告書を発行し、国内先行照射に向けた整理を行った。
- ✓ 一方、クロムコーティングは現行被覆管からの仕様変更および影響度合いも小さいことから、**早期に少数体先行照射を行い、速やかにATFの本格導入の検討を進めてまいります。**

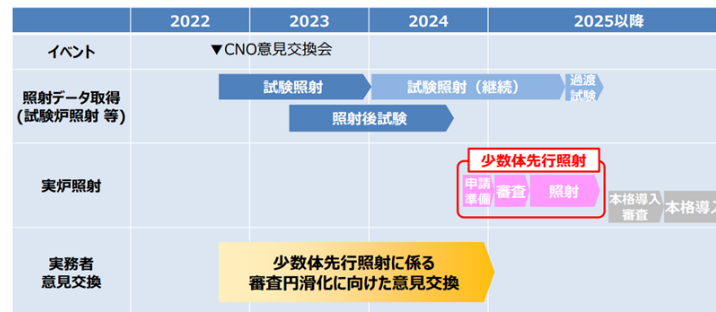


図 CNO意見交換会におけるATENA説明資料からの抜粋

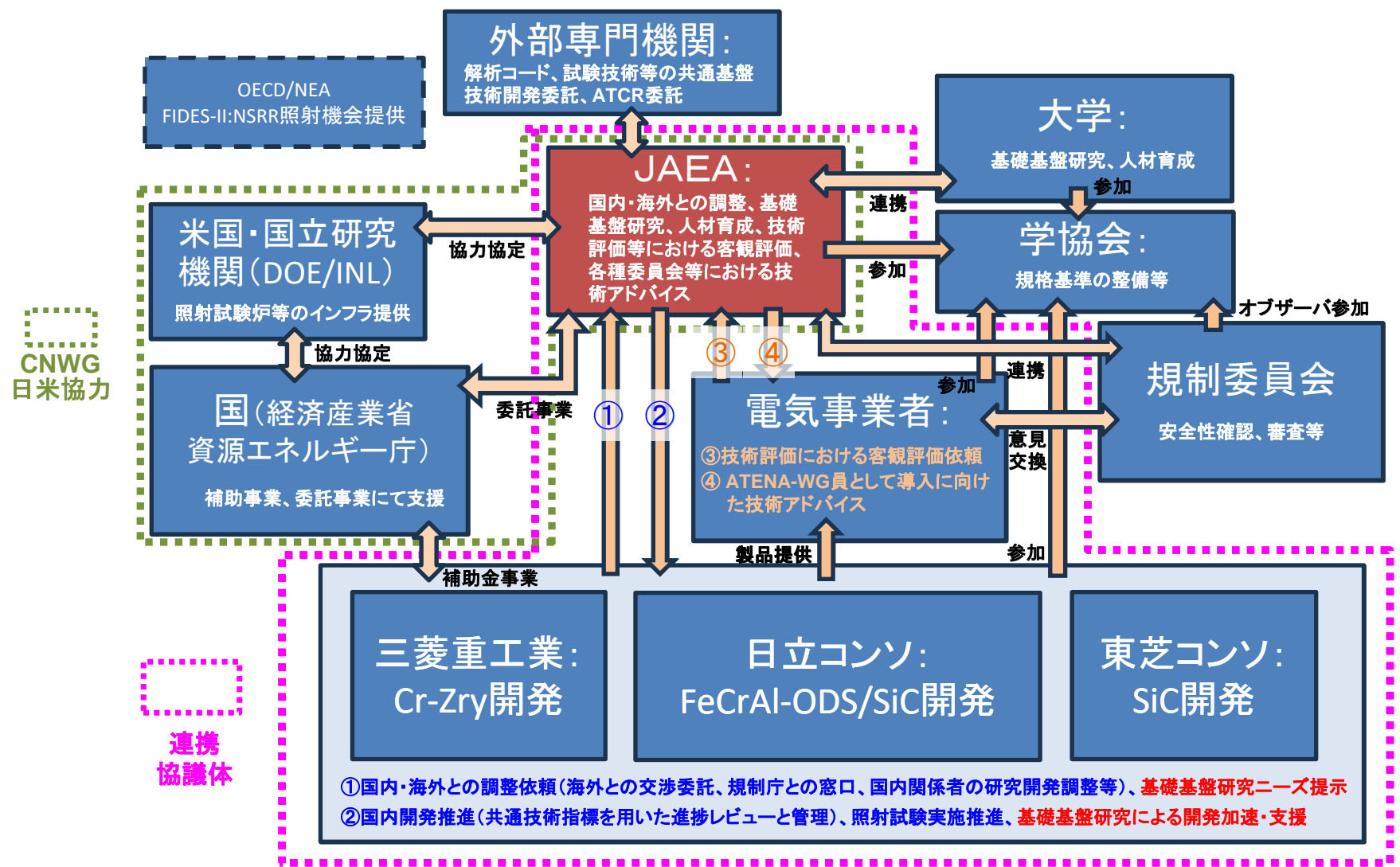
<https://www.nra.go.jp/data/000413504.pdf>

(\*1) コストシェアの考えに基づき、国プロが各ATF開発メーカーとJAEAで別事業化

(\*2) ATENA (原子力エネルギー協議会) : 原子力産業界の自律的かつ継続的な取り組み定着を目指して2018年に設立

# ①連携協力体制の構築 (2/2)

現在では、多くのステイクホルダーが有機的に連携・協力を図りながら**オールジャパン体制**でATFの研究開発が進められている。



CNWG : Civil Nuclear Energy Research and Development Working Group

- 日米政府（文科省&経産省－米国エネルギー省）間の民生用原子力研究開発ワーキンググループ（CNWG）を活用し、JAEAと米国・国立研究所等（\*）との協力チャンネルを民間事業者を提供。
- JAEAはORNLやINLと交渉し、照射インフラとして世界的にニーズが高かったHFIRやATRを用いた照射試験の実現に貢献。
  - ✓ オークリッジ国立研究所（ORNL）の高中性子束炉（HFIR）を用いたFeCrAl-ODSの材料照射試験（2017.2～2018.7）
  - ✓ アイダホ国立研究所（INL）の先進試験炉（ATR）を用いたCr-coated Zry燃料棒の照射試験を実施中（2023.4～）
  - ✓ INLのATRを用いてFeCrAl-ODS燃料棒の照射試験を実施予定（2024.10～）

(\*）米国・マサチューセッツ工科大学の多目的炉（MITR）を活用したSiCの照射試験も実施予定（2024.1～）

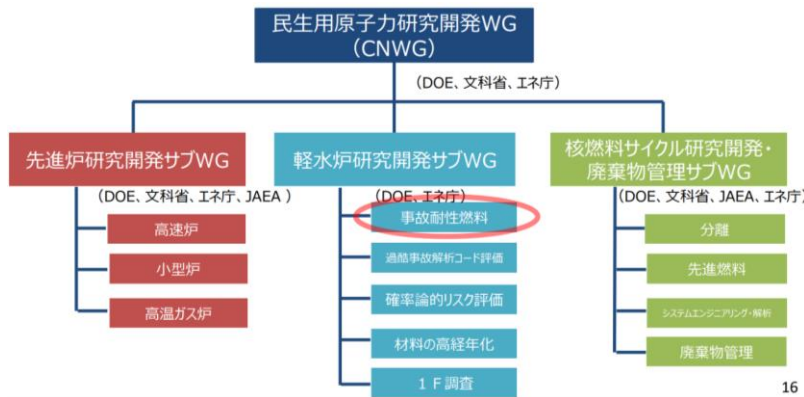


図1. 日米CNWGのもとで進められている各研究開発協力分野

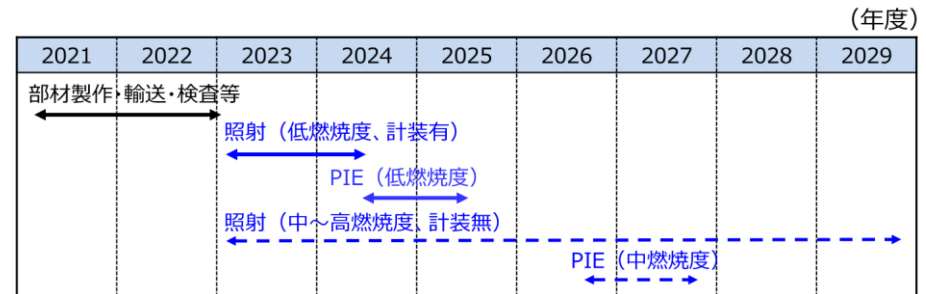


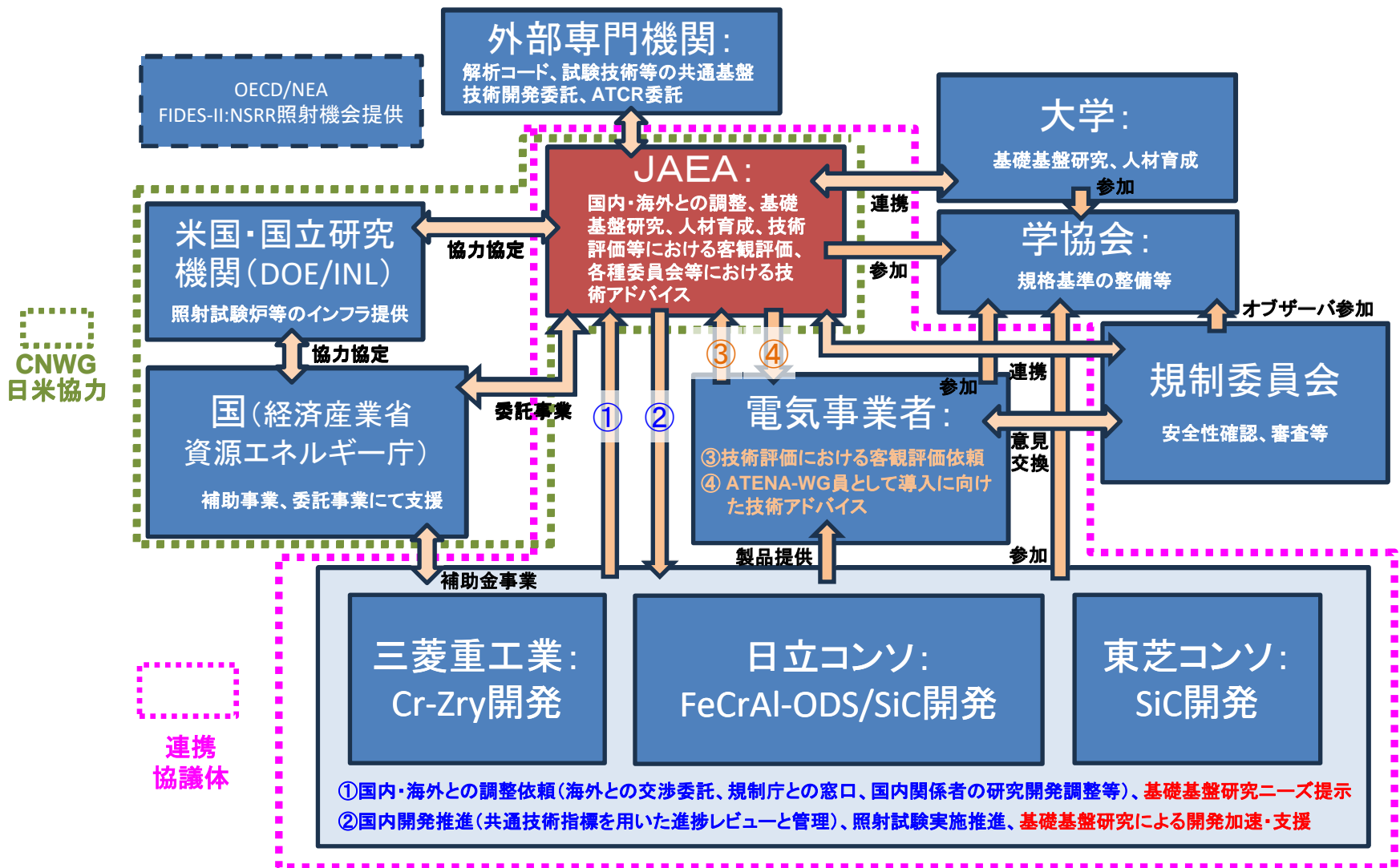
図2. ATRを用いたCr coated Zry燃料棒の照射試験スケジュール

出典：[https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2022w/atfws\\_material\\_1.pdf](https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2022w/atfws_material_1.pdf)  
ATFワークショップにおける経済産業省発表資料「事故耐性燃料導入への期待」からの引用

出典：<https://www.nra.go.jp/data/000413504.pdf> CNO意見交換会における原子力エネルギー協議会（ATENA）発表資料「事故耐性燃料（ATF）導入に向けた対応」からの引用

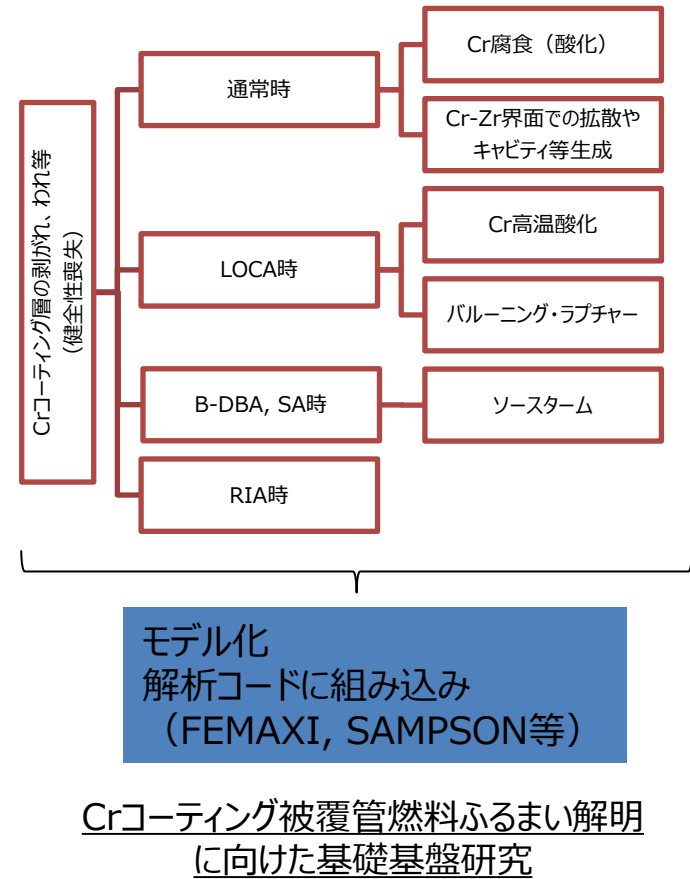
## ② 米国試験炉での照射試験の実現 (2/2)

ATFの早期実装化を見据えた研究開発においては、**米国との良好な関係を維持・発展**させつつ、一定程度の**照射試験炉インフラの活用**は今後も必要不可欠。



## 【基礎基盤研究の役割、実用化への寄与】

- 2030年代初頭の導入において、「事故時影響」「長期照射時の影響」の知見拡充により、予見性向上に寄与することが重要
  - 「Crコーティング層の剥がれ、われ等(健全性喪失)」に係り、メカニズムまで立ち戻って現象・挙動を解明してモデル化するため、米国PIRT等を調査して基礎基盤研究計画を立案し、研究を進めている。
  - 研究成果は燃料ふるまい解析技術(コード、科学的知見)として集約・継続的にアップデートし、ATF装荷炉の解析レファレンスとして予見性向上に役立てる。
- ↓
- コーティング最適化、後続のATF (FeCrAl-ODS, SiC) や新型被覆管等の設計に活用



設計基準事故 (DBA) ~ 過酷事故 (SA) までをカバーする、集合体レベルの燃料ふるまい解析コードを整備し、国際プロジェクト試験で検証して、事業者に参照解として提供

### 【実施内容】

- 冷却材喪失事故 (LOCA) 時におけるATF被覆管の変形挙動の詳細評価モデル構築を目的に試験装置の開発
- 構築したモデルの各種コード (FEMAXI、RANNS、SAMPSON) への組み込み
- LOCA試験やOECD/NEAの国際プロジェクト (QUENCH-ATF) での模擬バンドル試験結果との比較、検証

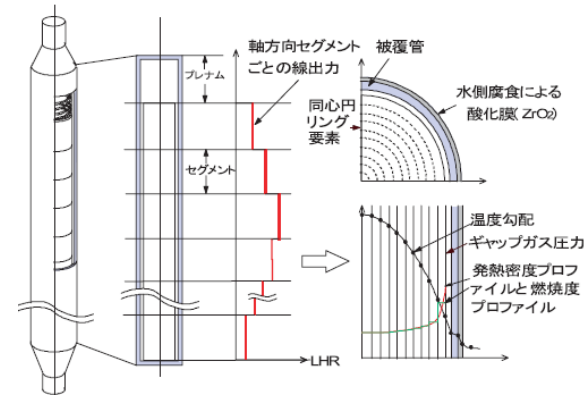
### 【期待される成果】

- DBA~SAの条件範囲をカバーする解析コードの連成化
- 燃料ふるまい解析手法の適用範囲拡充 (ピン単位~集合体レベル)

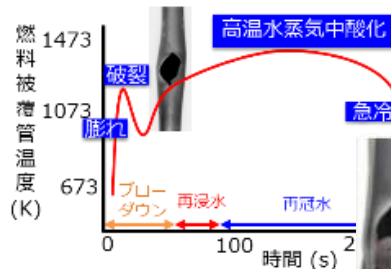
### 【成果の反映】

LOCA時におけるピン単位から集合体レベルまでの変形挙動に関する理解の深化、変形挙動の詳細評価モデル構築

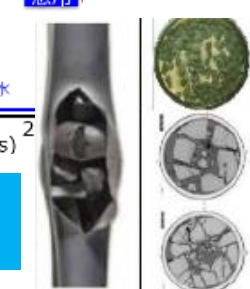
解析コードのATF-LOCA条件までの拡張、改良、解析



LOCA試験



被覆管、ペレットの破損挙動評価, etc,



集合体でのLOCA試験



国際プロジェクト (QUENCH-ATF) で実施中



原子炉燃料・材料開発における原子炉照射への依存度低減(\*)を目指した先進照射試験技術として、高燃焼度時の最重要課題である腐食挙動を含めた材料挙動の世界初の予測評価技術を開発し、ATFの実用化加速に貢献するとともに、新材料の開発に役立てる

(\*) 燃料・材料開発における原子炉照射への依存度：

これまで：試験炉照射 ⇒ 商用炉照射 (LTRとLTA) ⇒ 国内炉照射 (LUA) ⇒ 実装  
 合理化案：試験炉照射 + スマート技術による評価 (条件外挿) ⇒ 国内炉 (LTA) ⇒ 実装

### 【実施内容】

- 高温高压水環境下での加速照射実験が可能  
なイオン照射用試験装置を開発
- 照射下での被覆管表面組織の安定性に及ぼす照射と環境の重畳影響等を評価
- 重畳環境下での腐食挙動のモデル化

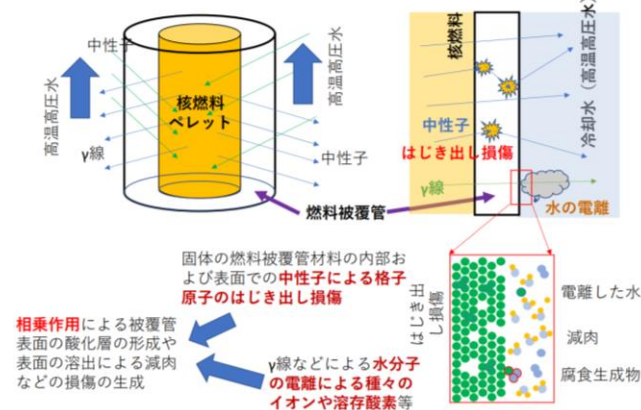
### 【期待される成果】

その場電気化学測定による照射下高温高压水中腐食挙動の評価

### 【成果の反映】

試験炉照射結果との比較による、燃料ふるまい挙動の予測精度の向上

通常運転時の燃料棒の周辺環境 被覆管外表面での事象



東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC)



圧力容器



高温水循環系



## 1. はじめに

- ✓ 事故耐性燃料（ATF）開発の経緯

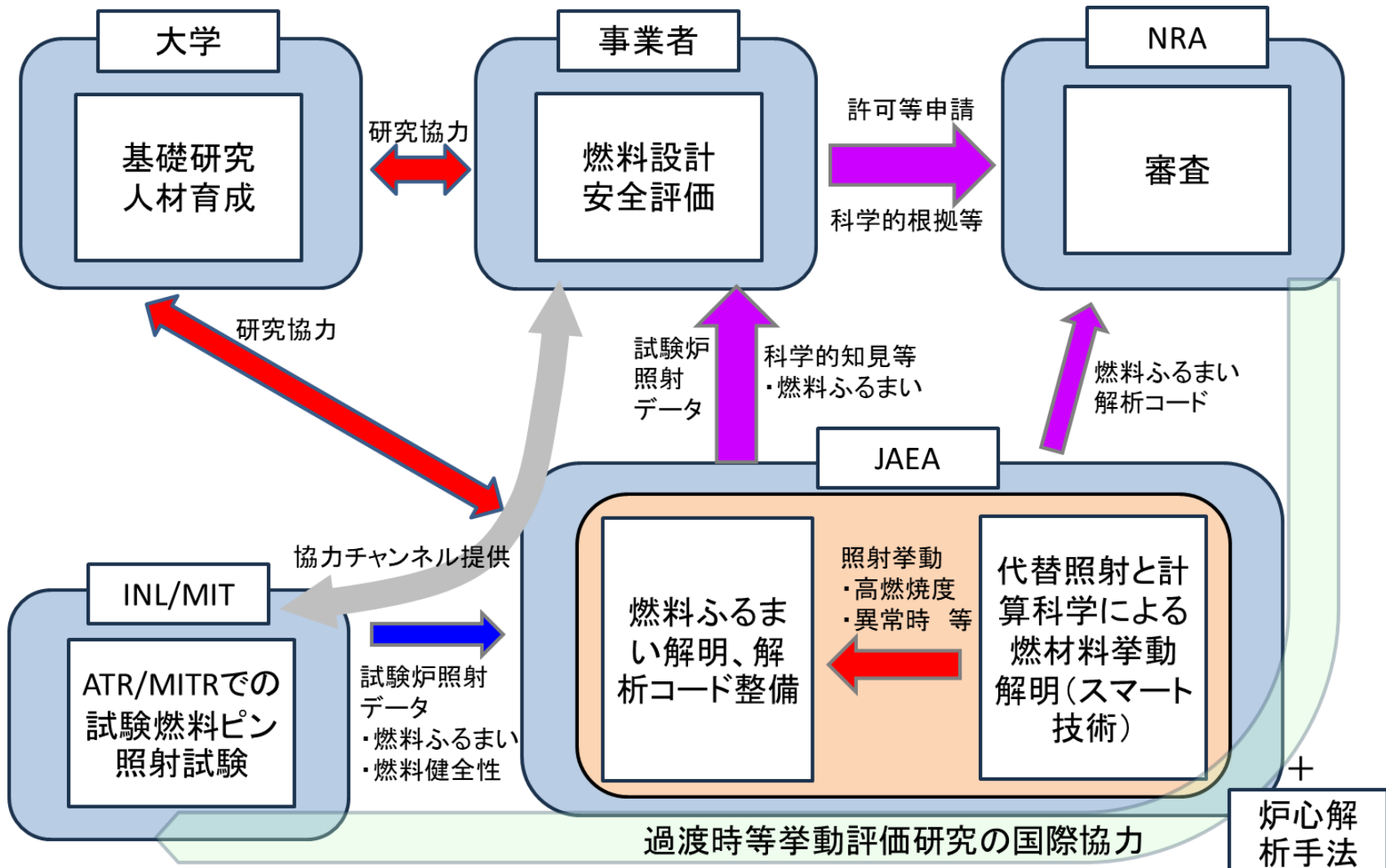
## 2. 国内におけるATF研究開発の全体像

- ✓ エネルギー事業で開発中のATFとその開発推進体制
- ✓ ATFの実用化までの流れ・開発ステップ
- ✓ ATF研究開発の加速化に向けたJAEAの基本的考え方
- ✓ ATF研究開発における課題へのJAEAの取り組み
  - 連携協力体制の構築
  - 米国試験炉での照射試験の実現
  - 基礎基盤研究の推進

## 3. ATF早期導入に向けた取組みと基礎基盤研究の役割

## 4. 各ATF候補材開発の取組みの現状

基礎基盤研究の役割：非常に限られた離散的なデータ（点）に科学的根拠を付加したデータ（線・面）に！ ➡ ATF実用化開発を加速



## 1. はじめに

- ✓ 事故耐性燃料（ATF）開発の経緯

## 2. 国内におけるATF研究開発の全体像

- ✓ エネ庁事業で開発中のATFとその開発推進体制
- ✓ ATFの実用化までの流れ・開発ステップ
- ✓ ATF研究開発の加速化に向けたJAEAの基本的考え方
- ✓ ATF研究開発における課題へのJAEAの取り組み
  - 連携協力体制の構築
  - 米国試験炉での照射試験の実現
  - 基礎基盤研究の推進

## 3. ATF早期導入に向けた取組みと基礎基盤研究の役割

## 4. 各ATF候補材開発の取組みの現状

| プログラム   |                               |               |
|---|-------------------------------|---------------|
| 開会挨拶  | 日本原子力研究開発機構                   | 大井川 宏之 氏      |
| >>イントロダクション   |                               | 10:10 ~ 10:20 |
| 『事故耐性燃料導入への期待』  | 経済産業省資源エネルギー庁                 | 瀧桐 基皓 氏       |
| >>基調講演  |                               | 10:20 ~ 10:50 |
| 『新技術の導入について』  | 東京大学大学院                       | 更田 豊志 氏       |
| >>講演  |                               | 10:50 ~ 12:00 |
| 『国内のATF研究開発概要』  | 日本原子力研究開発機構                   | 山下 真一郎 氏      |
| 『ATF開発に向けた基礎研究とその展開』  | 東京大学大学院                       | 阿部 弘亨 氏       |
| >>ポスターセッション   | ※1230から開催                     | 13:00 ~ 14:15 |
| 発表者所属：東京大学、京都大学、大阪大学、早稲田大学、北海道大学、東北大学、量研機構、原子力機構、電中研、原子力規制庁、MHI、東芝ESS、日立GE、GNF-J、NFD、材料部会、水化学部会、他 |                               |               |
| >>技術講演  |                               | 14:30 ~ 16:30 |
| 『SiC被覆管/チャンネルボックスの開発』   | 東芝エネルギーシステムズ                  | 大脇 理夫 氏       |
| 『FeCrAl-ODS被覆管及びSiC被覆管の開発』  | 日立GEニュークリア・エナジー               | 土屋 暁之 氏       |
| 『Crコーティング被覆管の実機導入に向けた取り組み』  | 三菱重工業                         | 佐藤 大樹 氏       |
| 『新設計燃料の導入に向けた炉心燃料分科会の活動』  | 日本原子力学会標準委員会システム安全専門部会炉心燃料分科会 | 村上 望 氏        |
| >>総合討論、まとめ、講評   |                               | 16:30 ~ 16:55 |
| 開会挨拶  | 東京大学大学院                       | 阿部 弘亨 氏       |

各ATF候補材開発の取組みの現状は、この後の「ポスターセッション」、及び「技術講演」において詳細報告がなされる予定

## ポスターセッションプログラム

|    |  |                    |
|----|--|--------------------|
| 1  | 金属被覆ジルコニウム合金型事故耐性燃料の開発   | 東京大学 叶野 翔          |
| 2  | Direct experimental evidence of the reduction of Cr2O3 by Zr at high temperature   | 東京大学 Kejian Wei    |
| 3  | Evaluation of Mechanical Behaviors of Chromium-Coated Zircaloy for Accident Tolerant Fuel Cladding Materials                       | 東京大学 魏 子棋          |
| 4  | Cr-Based Binary Alloys and their Corrosion Behavior Analysis for ATF   | 東京大学 J. J. A. Kane |
| 5  | Microstructure and evolution of Cr/Zry4 interfaces for accident tolerant fuels   | 東京大学 BO LI         |
| 6  | 分類機械学習モデルによるウラン化合物の熱伝導率予測  | 京都大学 孫 一帆          |
| 7  | Preliminary Fuel Performance Modeling of Cr Coated Fuel During LOCA with FEMAXI-8  | 早稲田大学 出原 蒼己        |
| 8  | FEMAXI-ATFによるPCMIを伴う出力過渡時SiC被覆燃料挙動解析   | 早稲田大学 久保 恵裕        |
| 9  | FeCrAl-ODS被覆管のLOCA時挙動評価  | 東京大学 成川 隆文         |
| 10 | 原子力材料としての低放射化高濃度固溶体の開発研究   | 北海道大学 岡 弘          |
| 11 | SiC/SiC複合材料へのCVD被覆プロセスインフォマティクス  | 東北大学 近藤創介          |
| 12 | セラミックス多層コーティングの強度評価法の開発と照射効果   | 東北大学 宮岸 太一         |
| 13 | SiC/SiC複合材料の界面マイクロメカニクス評価技術開発  | 量研機構 野澤 貴史         |
| 14 | JAEAにおけるATF基礎基盤研究  | 原子力機構 塚坂 正彦        |
| 15 | The transition of protective coating to no-longer protective coating of Cr-coated Zry cladding in high-temperature steam oxidation | 原子力機構 モハマド アフィカ    |
| 16 | イオン照射下軽水炉環境での腐食挙動評価技術の開発   | 原子力機構 相馬 康孝        |
| 17 | BWR用8×8単一集合体体系における沸騰シミュレーション   | 原子力機構 神谷 朋宏        |
| 18 | マルチフィジクスプラットフォームJAMPAN の開発   | 原子力機構 多田 健一        |
| 19 | Study on FP chemistry for improvement of LWR source term   | 原子力機構 リザール ムハンマド   |
| 20 | Crコーティング事故耐性燃料被覆管の高温酸化モデル検討  | 原子力機構 谷口 良徳        |
| 21 | 原子力規制庁における核燃料安全研究計画について -事故耐性燃料等の事故時挙動研究-  | 原子力規制庁 江口 裕        |
| 22 | 材料部会ロードマップの概要  | 原子力機構 大久保 成彰       |
| 23 | 水化学ロードマップ2020におけるATFの技術課題  | 電中研 河村 浩孝          |
| 24 | 燃料プラットフォームの活動とATF  | 電中研 中森 文博          |
| 25 | Development of SiC core material for LWR   | 東芝ESS 窪谷 悟         |
| 26 | Crコーティング被覆管の事故時性能及び特性  | 三菱重工業 岡田 裕史        |
| 27 | Crコーティング被覆管の通常運転時性能及び特性  | NDC 小方 宏一          |
| 28 | FeCrAl-ODS被覆管の研究開発   | NFD 坂本 寛           |
| 29 | BWR適用に向けたSiC被覆管の要素技術開発   | 日立GE 石橋 良          |