共通技術基盤SWGでの議題案
-解析の観点から-

日本原子力研究開発機構

2025.12.05「共通技術基盤サブワーキンググループ（SWG）打合せ」

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター

無断複製・転載・転用を禁じます

本日の内容

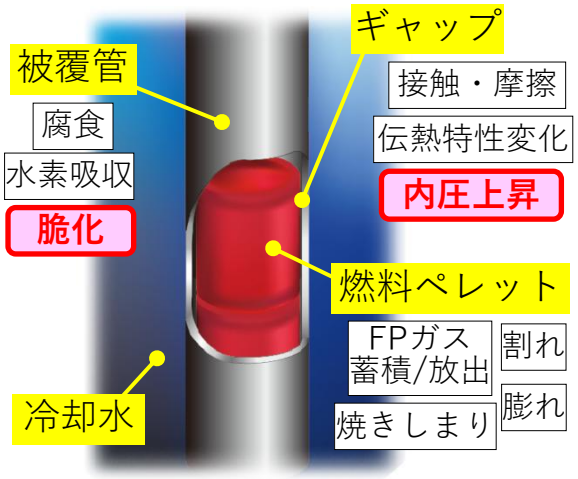
- 日本原子力研究開発機構が開発している燃料挙動解析コードFEMAXIについて、その役割と開発状況を簡潔に紹介する。
- 現在進行しているATF向け要素モデルの整備に係る国内協力を一例に、共通基盤としてのコード開発及び利用に向けた協力体制構築への期待について述べる。
- 解析の観点でSWGからご意見伺えると良いと考える項目、また技術的な課題について意見を述べる。

燃料挙動解析コード

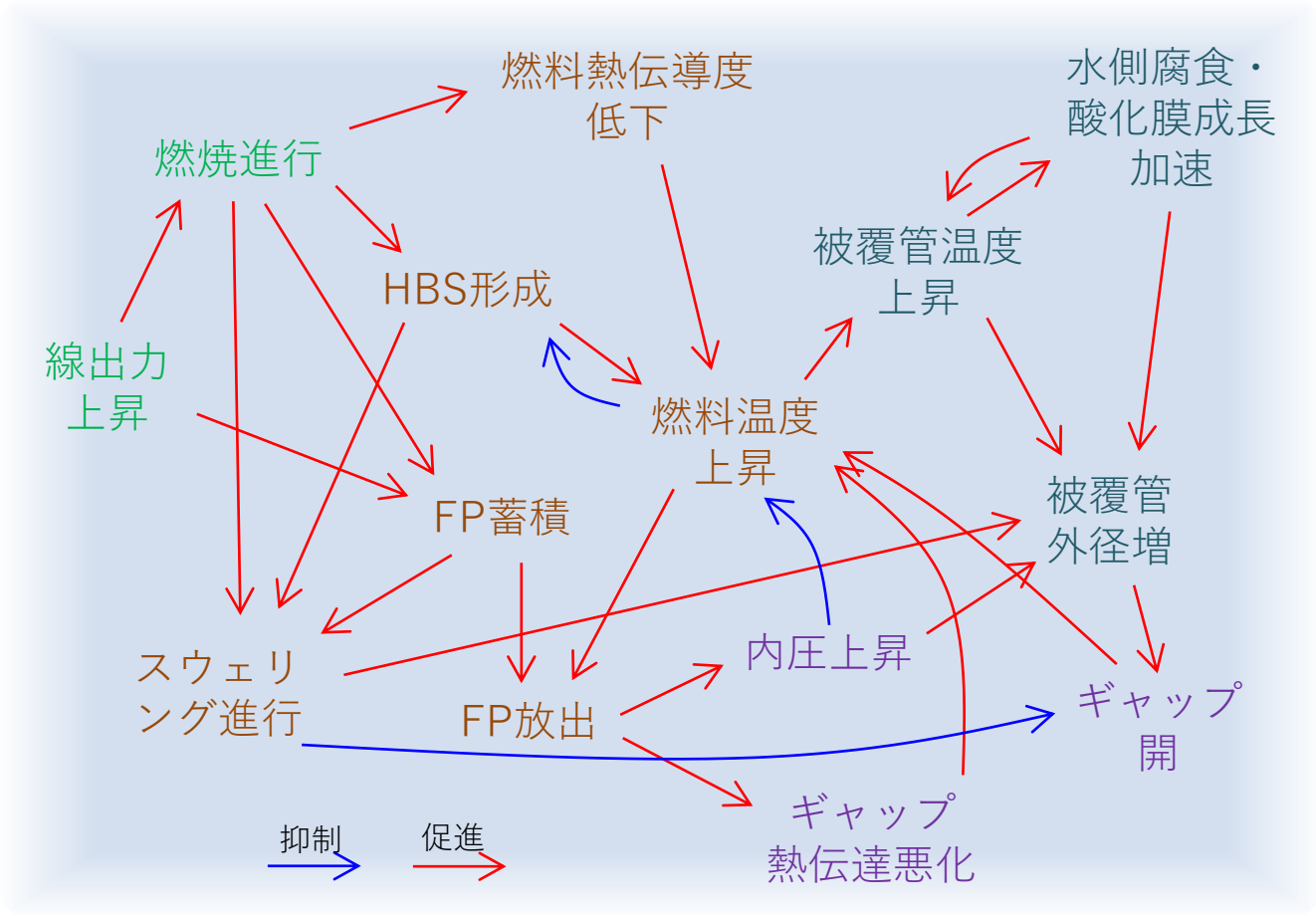
原子炉内で照射される核燃料の複雑な挙動を評価可能とするための工学的・技術的手段

FEMAXI-8コード

バージョンIV以降JAEAが開発/改良を継続



燃料棒で生じる現象

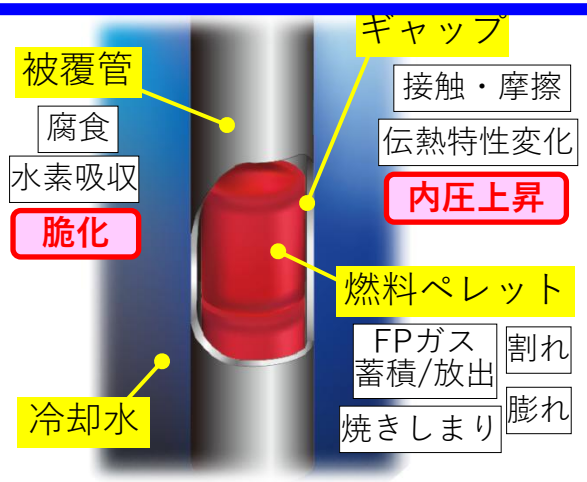


軽水炉の燃料棒内で生じる現象の間に考えられる相関の例（一部）

- ✓ 長期の照射に伴い燃料の構成要素に生じる諸々の変化/現象、それらのフィードバックが、燃料の健全性に及ぼす影響を把握する

FEMAXIコード

FEMAXI-8コード
バージョンIV以降JAEAが開発/改良を継続



燃料棒で生じる現象

事故時挙動解析に対応するための派生コードとして、**RANNS**の開発が、2000年代初頭に別途、着手された

開発/改良版を逐次**公開**、産/官/学へ提供

- 燃料挙動の予測、健全性評価
- 実験データの実機条件への変換
- 実験で直接計測出来ない物理量の推定
- 現象における支配的因子の抽出

JAEAによる**開発/公開** >>>>

FEMAXI → 大学
FEMAXI → 原子力規制庁
FEMAXI → 燃料メーカー
FEMAXI → 電力
FEMAXI → 研究所

様々な研究開発用途で活用

事故耐性燃料挙動解析コード開発
MOX燃料挙動評価手法の高度化
ADS/窒化物燃料コード開発
核燃料直接処分に係るFP放出評価
低減速炉の設計研究

ATFの社会実装加速に向けた共通技術基盤としてのコードの役割

- ATFのような新技術は実用化に向けた各段階では、ふるまい評価上の多様な変化と不確かさが伴う。
  - 変化と不確かさは安全上重要なものとそうでないものがあるため、多くのPIRTはまず専門家によるエンジニアリングジャッジを通じ篩の役割を果たそうとする側面がある 。
    - 一方、各現象が複雑に相互作用する燃料ふるまいにおいては、選別に定量的な評価が伴わなければならない。



- 新技術の社会実装がそのリスクを合理的な形で織り込みつつ進められていく上では、認識された変化・不確かさの安全上の重要度について、特に規制・被規制者間で適切な共通認識・相場観が共有・醸成されている必要がある。
  - 事業者に限らず様々な研究開発主体によるこのような定量的評価の実施、発信と蓄積は、醸成の代表的な過程と捉えられる 。
  - 共通技術基盤としての燃料挙動解析コードは、各機関・専門家間の定量的な議論を支える「共通言語」となり得る。

モデル高度化/現象理解進展に向けて

国際照射試験DB:
Halden/TFDB, NEA/IFPE,
+ JAEA独自データ, …

検証照射試験DB

	UO_2	MOX	Gd-doped
Burnup [GWd/tU]	3–99	15–72	25–95
Max. LHR [W/cm]	146–585	201–469	174–392
Rod pressure [MPa]	0.1–3.4	0.1–2.6	1.0–2.6
He ratio in rod filler gas	0.0–1.0	1.0	0.5–1.0
P/C gap [μm]	42–508	75–290	49–186

通常運転/異常過渡
相当条件での挙動
(FEMAXI)



計算科学的手法の寄与
素過程/モデル概念の検証/提案
微視的パラメータの評価
(FP,MD,…)

検証
検証
検証
C

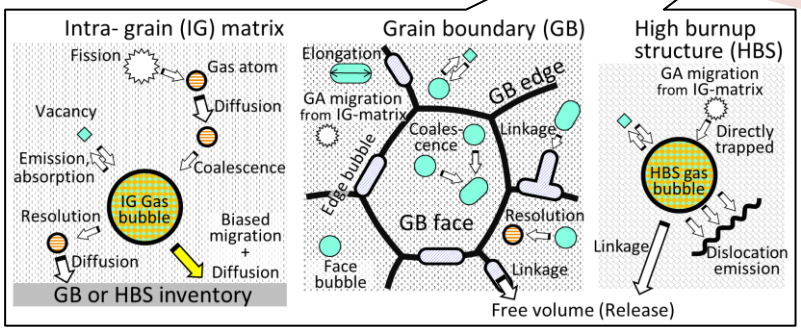


検証照射試験DB

	LOCA	RIA	SET
Burnup [GWd/tU]	xxx	xxx	xxx
Max. LHR [W/cm]	xxx	xxx	xxx
Rod pressure [MPa]	xxx	xxx	xxx
He ratio in rod filler gas	xxx	xxx	xxx
P/C gap [μm]	xxx	xxx	xxx

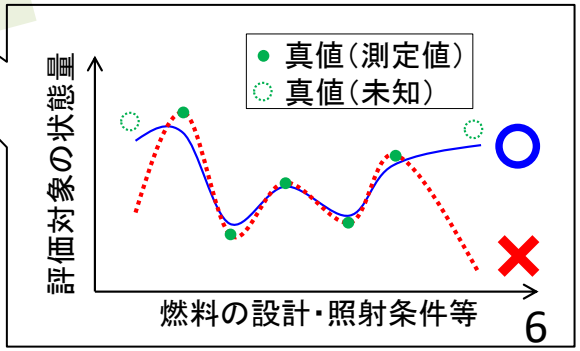
事故条件下の挙動
(FEMAXI/RANNS)

拡散係数等、不確かさの大きい
パラメータ、経験的に決めざる
を得ないパラメータ多数



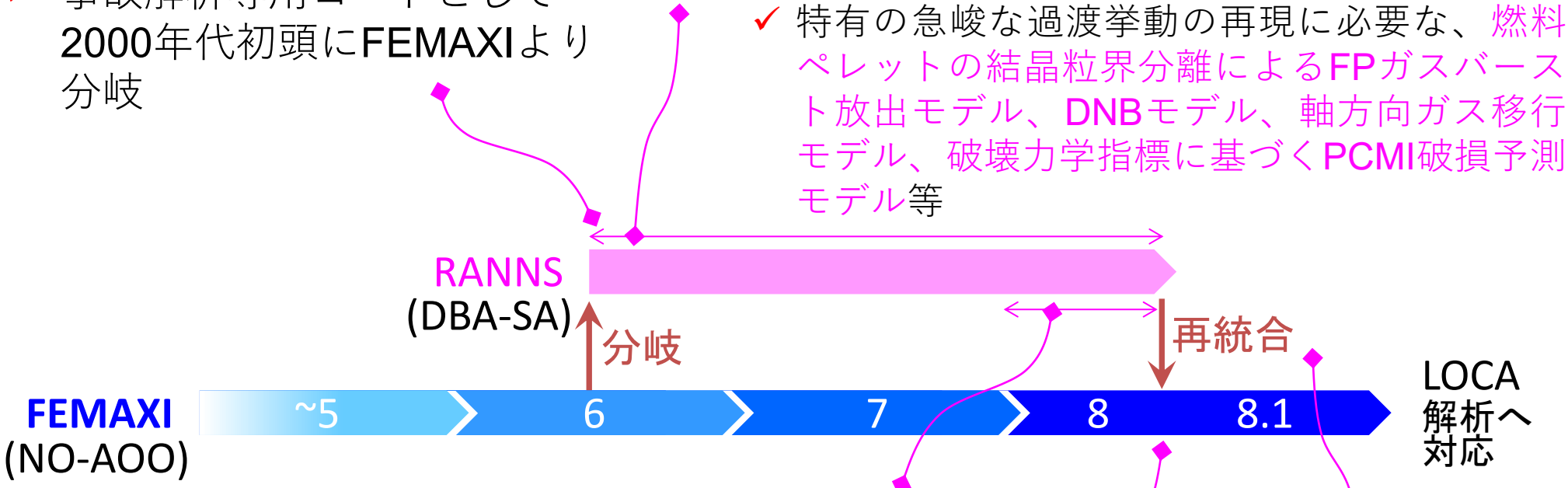
多様な拘束条件の獲得
諸条件を一手に扱える
統合コード化の動機

検証の多様性・多重性向上
＝外挿性・信頼性の向上

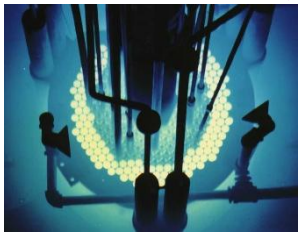


RANNS (RIAモジュール): 概要

- ✓ 事故解析専用コードとして2000年代初頭にFEMAXIより分岐
- ✓ RIA解析向けの専用モデルを開発：
  - ✓ 特有の急峻な過渡挙動の再現に必要な、燃料ペレットの結晶粒界分離によるFPガスバースト放出モデル、DNBモデル、軸方向ガス移行モデル、破壊力学指標に基づくPCMI破損予測モデル等

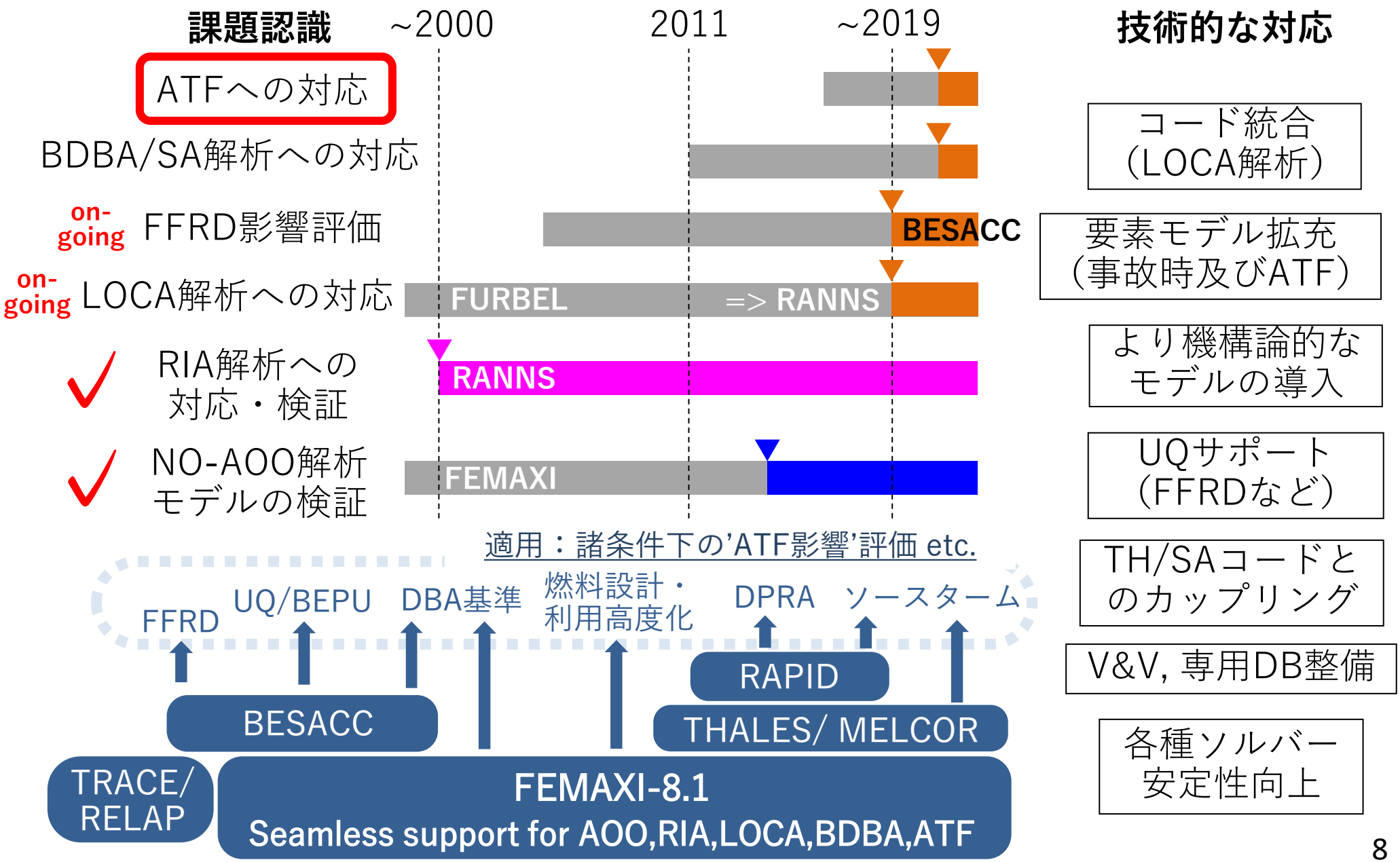


- ✓ NSRR試験プロジェクトで蓄積したRIA試験+ベース照射挙動データをV&V-DB化



- ✓ RIA解析モジュールの総合性能評価を実施、レポート化を経て、2024に公開済み
- ✓ 事故解析専用モデル・処理群をRANNSモジュールとして切り分け、**基幹モジュール**（~8割）を**統合**
- ✓ **LOCAモジュール整備本格化の要件**

燃料挙動解析技術整備に係る課題認識



ATF被覆管材料向け要素モデルの導入・整備状況

国内機関の連携による整備：各ATF被覆管材料向け要素モデルの整備、試計算をJAEA NSECや早稲田大学が進め、これらをJAEA NSRCがFEMAXI-8へ集約・整理している

Cr-coating

- ✓ 2016-2022にかけNSEC、早大による熱・力学物性モデルの整備(1)、NSRCによるFEMAXI-8への組み入れ
- ✓ 2022-2024にかけNSRCにて事故解析モデルの開発・検証

FeCrAl

- ✓ 2016-2021にかけNSRC、早大による熱・力学モデルの整備(2,3,4)、2019-2021にかけNSRCによるFEMAXI-8への組み入れ

SiC

- ✓ 2016-2023にかけNSRC、早大による熱・力学モデルの整備(5,6)
- ✓ 2021以降福井工大にてFEMAXI-8への組み入れ・試解析(7)

(1)出原ら、Fuel Performance Analysis of Cr-Coated Fuel During Startup and Normal Operation of LWRs Using FEMAXI-8、TOPFUEL2022
(2)山路ら、Analysis of FeCrAl-ODS Cladded Fuel Performance During BWR Power Ramp with FEMAXI-7、TOPFUEL2019
(3)山路ら、Recent Progress in Development of Accident Tolerant FeCrAl-ODS Fuel Claddings for BWRs in Japan、TOPFUEL2019
(4)山路ら、Benchmark of Fuel Performance Codes for FeCrAl Cladding Behavior Analysis、TOPFUEL2019
(5) Y. Kubo, A. Yamaj, Nuclear Engineering and Technology 56 (2024) 846–854
(6) Y. Kubo, A. Yamaj, Nuclear Engineering and Technology 57 (2025) 103558
(7)松浦ら、事故耐性燃料（SiC被覆管）の適用性検討、福井工業大学研究紀要 第53号 2023

ATF被覆管材料向け要素モデルの導入・整備状況

国内機関の連携による整備：各ATF被覆管材料向け要素モデルの整備、試計算をJAEA NSECや早稲田大学が進め、これらをJAEA NSRCがFEMAXI-8へ集約・整理している

	Cr-coating	FeCrAl	SiC
ヤング率	○	○	△
ポアソン比	○	○	△
熱伝導率	○	○	△
熱膨張	○	○	△
比熱	○	○	△
クリープ	○	○	△
密度	○	○	△
塑性	○	○	△
腐食速度	○	○	△

○：導入済み　△：確認中

組織間連携への期待

原子力機構

NSEC

- 要素試験の実施
- ATR照射CC-MDA燃料挙動の解析
- 材料物性DB整備

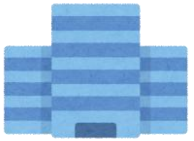
NSRC

- モデル組み込み
- 照射試験DB整備(OECD/NEA FIDES pjなど)
- V&V

- 多様な条件に対し一定の性能検証を経た燃料挙動解析基盤として還元

- まだ考慮されていない材料特性またはふるまいに係るモデルの提案
- 試験等から得られた新知見
- 機構の研究開発に関する指摘・助言

産官学

- 新燃料・新型炉開発
- 事故を含む諸条件下のふるまい評価
- 基準の保守性評価

などに活用

- 多様な専門家
- モデル化等を遂行する高い技術力
- 機構が持っていない装置を用いた試験の遂行

解析に係る検討項目の例

- ATFプラットフォームは以下の様な観点でご意見を集約できる機会として好適

開発ニーズ・優先度について

・ATF関連モデルの充実
・機構論モデルの充実
・検証範囲の拡大

} 統計評価（不確かさ影響評価）への対応

・ユーザビリティ向上
・非軽水炉燃料への対応　　etc…

特に照射下や高温条件下等、データが乏しくかつ短期での拡充も難しいモデルで取るべき不確かさ設定の在り方

組織間連携の活用のあり方