共通技術基盤としてのFEMAXI-8.1の信頼性向上と成果創出に向けた展望

日本原子力研究開発機構
安全研究センター　燃料安全研究グループ
田崎　雄大

令和 8年 2月 16日
共通技術基盤SWG第1回会合

E-mail: tasaki.yudai@jaea.go.jp

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

背景・本日の内容

- 日本原子力研究開発機構は、ATF（CCZ, FeCrAl, SiCなど）実用化に向けた共通技術基盤となるコード開発に取り組んでおり、燃料挙動解析コードFEMAXIへのATF物性及び挙動モデルの組み込みとモデルの検証を進めている。

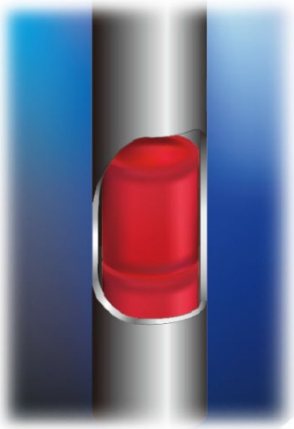
- FEMAXIが、共通技術基盤としてATFの実用化に向けた活動を加速・補助するためには、まずモデル等の課題整理・検証を適切に進めることで、コードの信頼性を高める必要ある。

- 本日は、国内外で試験や調査が比較的進んでいる（成果物の展望が見えやすい）Cr-coated Zry被覆管の高温酸化挙動を代表して、現在のFEMAXIが持つモデルと現在の検証結果について簡単に紹介しつつ、モデル化と検証が進んだFEMAXIが、どのようなプロダクトを創出し得るかについて私見を述べる。

燃料挙動解析コードFEMAXIの概要

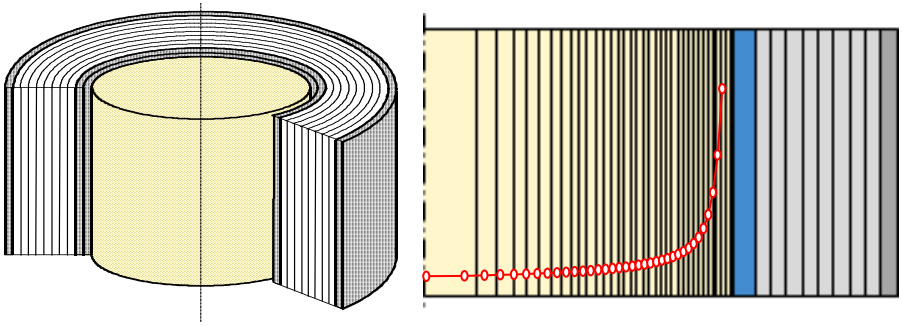
- 燃料ふるまいコード … 原子炉内で照射される核燃料の複雑な挙動を評価可能とするための工学的・技術的手段
- 複雑な熱水力挙動や物体の移行は別コードとの組合せで対応（TH/SAコード, CFDコード）

- 1D/1.5Dの簡素な熱/力学計算モデル

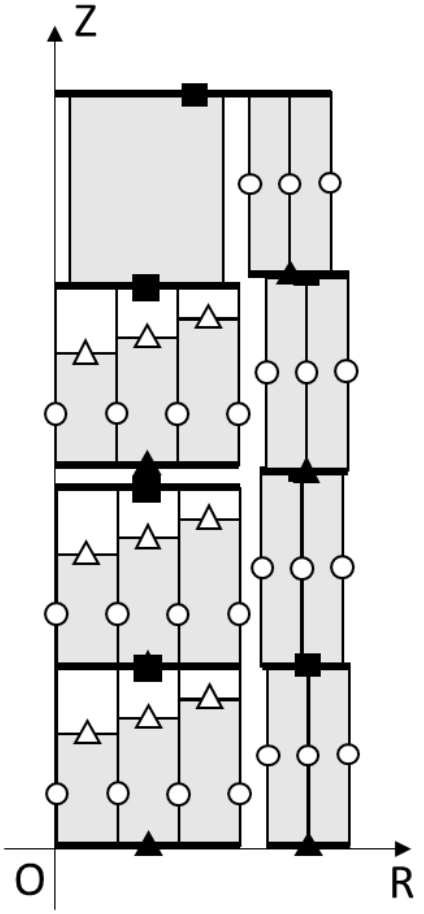


モデル化

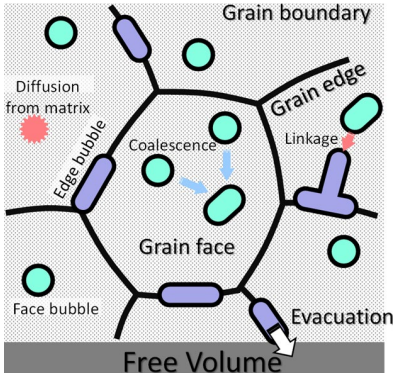
ペレットと被覆管の径方向メッシュ分割



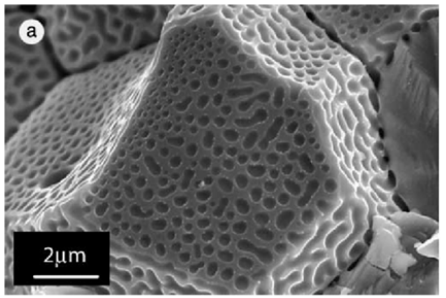
力学解析の構造



- 核燃料特有の要素モデル（例：FPガス挙動）



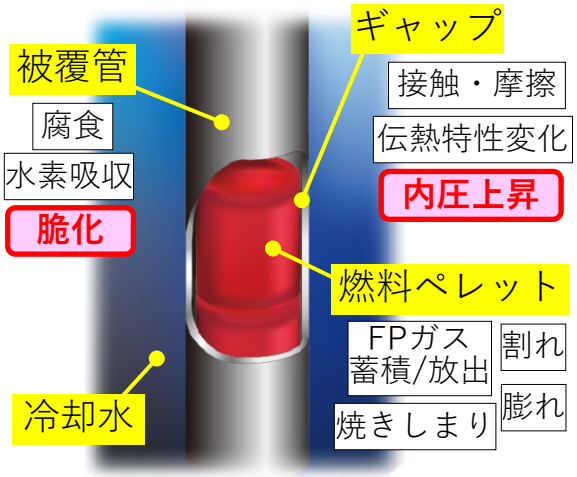
1. 結晶粒内から粒界にガスが移行（右図の状態）
2. 粒界ガスバブルが合体（●）
3. バブルが粒端に結合（●⇒●）
4. ガス量や圧力を閾値としてペレット外へ放出



燃料挙動解析コードFEMAXIの概要（続き）

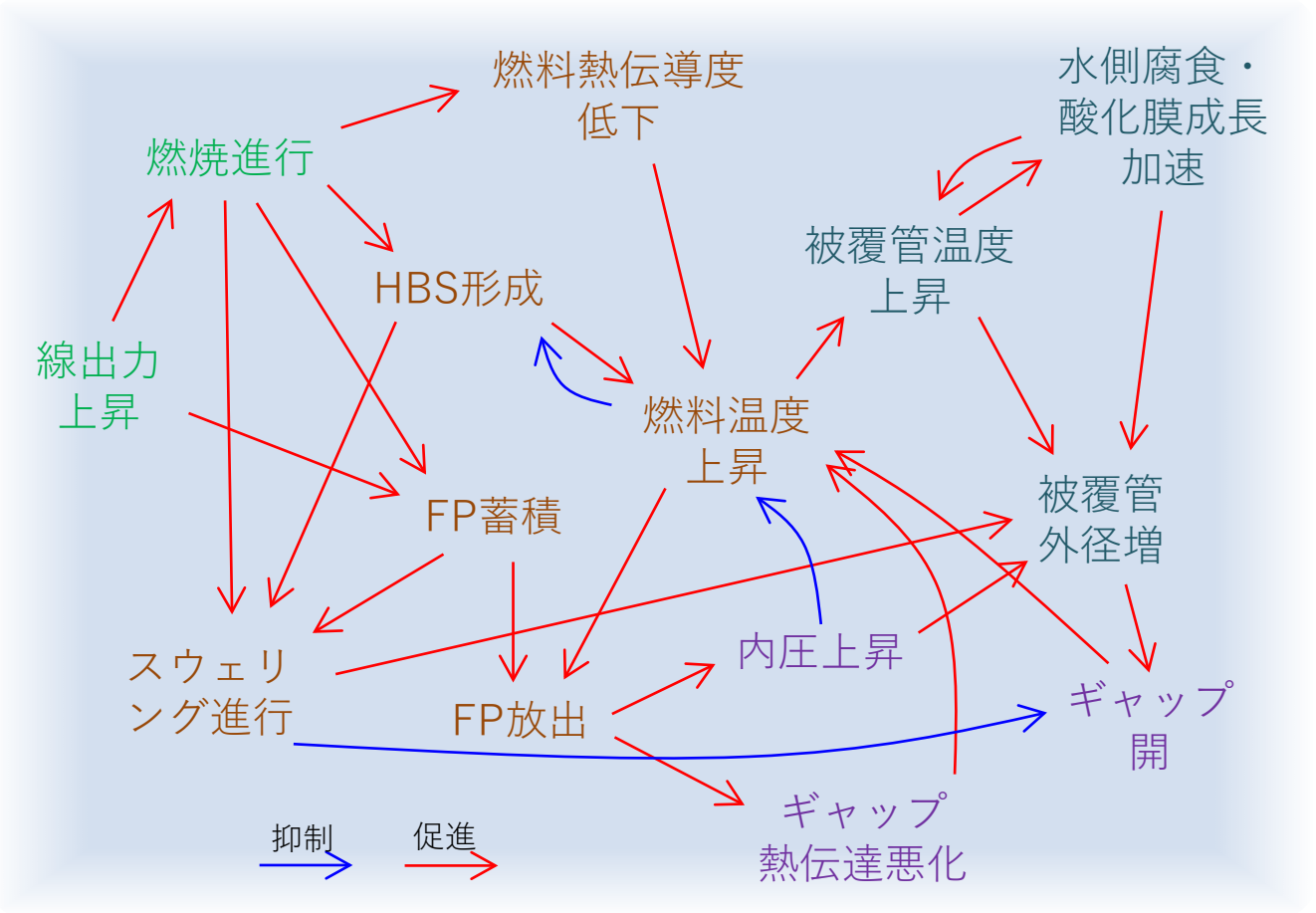
FEMAXI-8コード

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

- ✓ 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



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）

コードの信頼性向上に向けた課題抽出

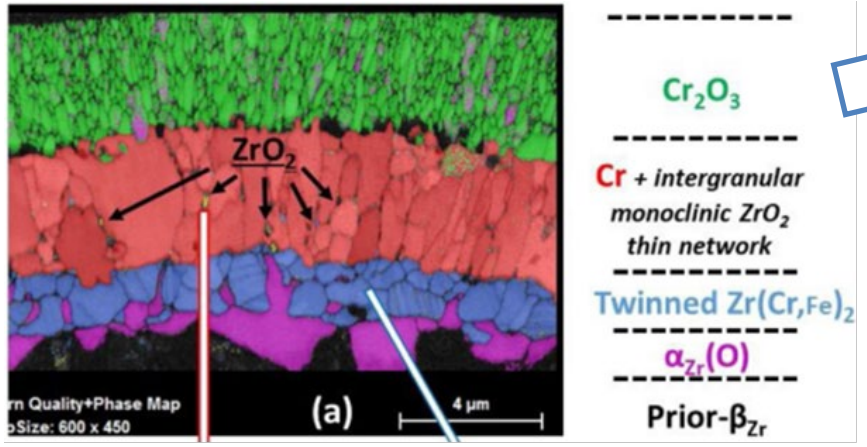
- 各ATF材料について行われたPIを参考に、モデル化及び検証の進捗、課題の整理を行う。（26年末くらいを目途にまとめる。◎が「特段追加の検討は無い」の意。）

材料	特性・挙動	モデルの充実度	モデル検証	課題（一例）
Cr-coated Zry	熱機械物性	○	×	照射効果
	腐食	○	△	燃焼度進行に伴う腐食 コーティング割れが伴う場合
	共晶	○	△	厚さや昇温速度（RIAも含む）が及ぼす影響
	破損	×	×	基本的な機械物性の検証がまず先
	表面熱伝達	×	×	照射効果、事故時
FeCrAl	熱機械物性	△	×	照射効果
	…	…	…	…
SiC	熱機械物性	○	×	照射効果
	…	…	…	…
ペレット	熱機械物性	△	△	高ガドリニア含有、クロミア・アルミナ添加など
	…	…	…	…

⇒ 検証結果や抽出された課題は各SWGの活動・PIRTへのフィードバックにもなる。

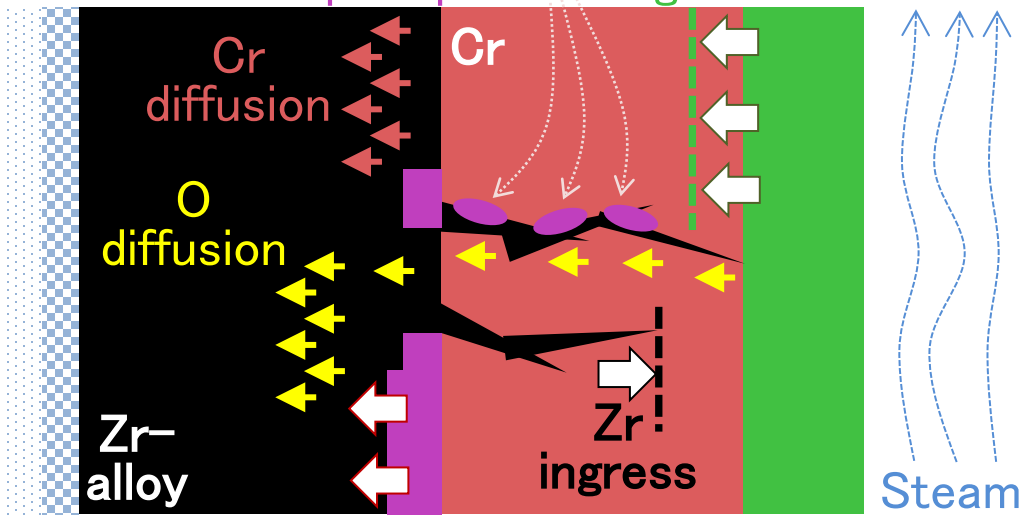
Cr-coated Zr基合金被覆管向け高温酸化モデル

- CCZはZryに比べ高い高温酸化耐性を示す一方、保護効果には限界がある。
- 実験データ*を基にコーティングの劣化挙動をモデル化**
- 現行LOCA基準では酸化量が基準の一つとなっており、CCZにおいても事故耐性評価、延いては基準策定を左右する重要な状態量であると考えられる。



高温酸化試験後の SEM-EBSD phase map*

*J.C. Brachet, et al., Corros. Sci., 167 108537 (2020)



④ 侵食Zrの酸化/析出

母材金属層へのCr拡散 ②

① 外面側クロミア成長

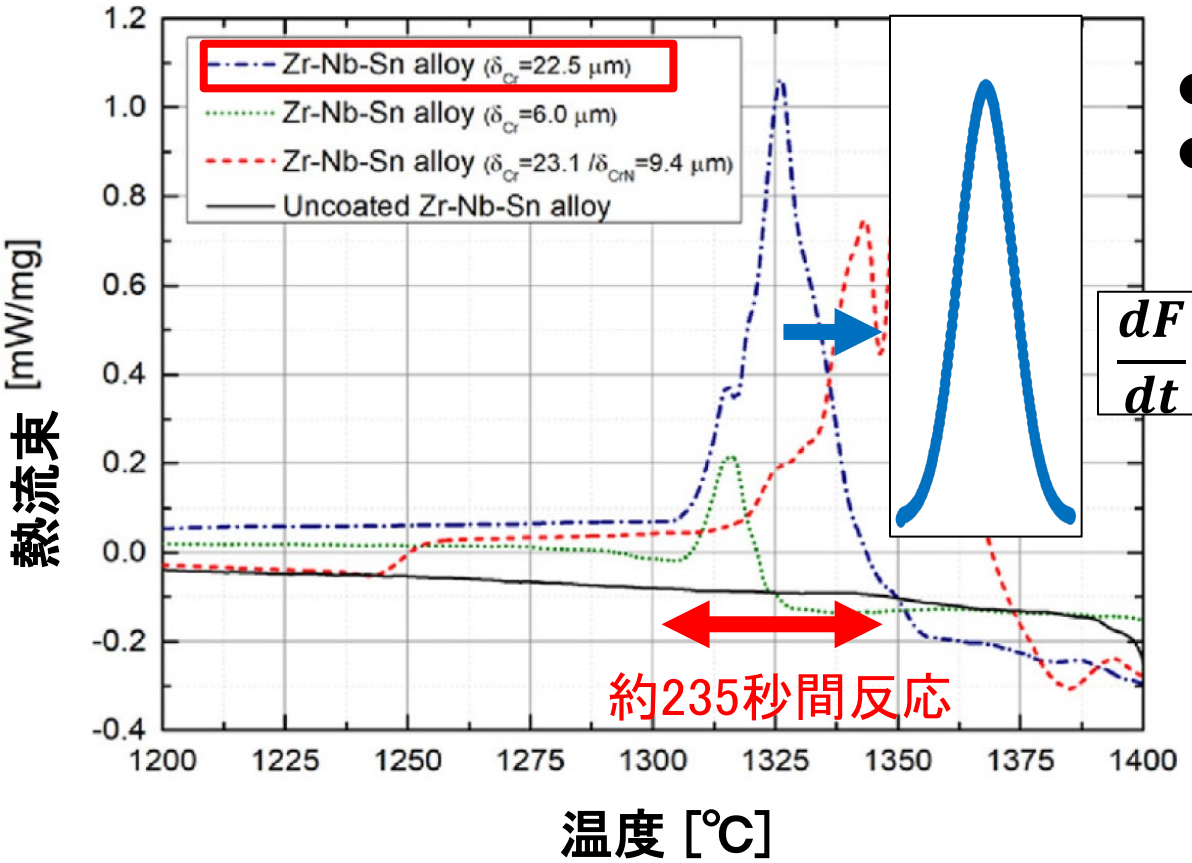
⑤ Cr層と母材金属層界面でのZrO2層形成と成長

③ 界面からのZr侵食

**谷口良徳 他. 日本原子力学会2023年秋の大会. 愛知. (2023).

共晶反応モデルの概要

- CrとZrの界面では、約1320℃で共晶反応により局所的に融点に到達。CCZの事故耐性評価を左右する重要なモデル要素の一つ。
- 示差走査熱量計（DSC）を用いて捉えた共晶反応によるCrの溶融・拡散挙動*を基にコーティング厚さ減少速度をモデル化**。



- CCZを一定の速度で昇温。
- 共晶開始後、生じた反応熱が反応速度に相当すると仮定。

$$\frac{dF}{dt} = 0.4 \cdot \exp(-0.008 \cdot (T - 1325)^2)$$

F：反応相厚さ（μm）
T：被覆管温度（℃）

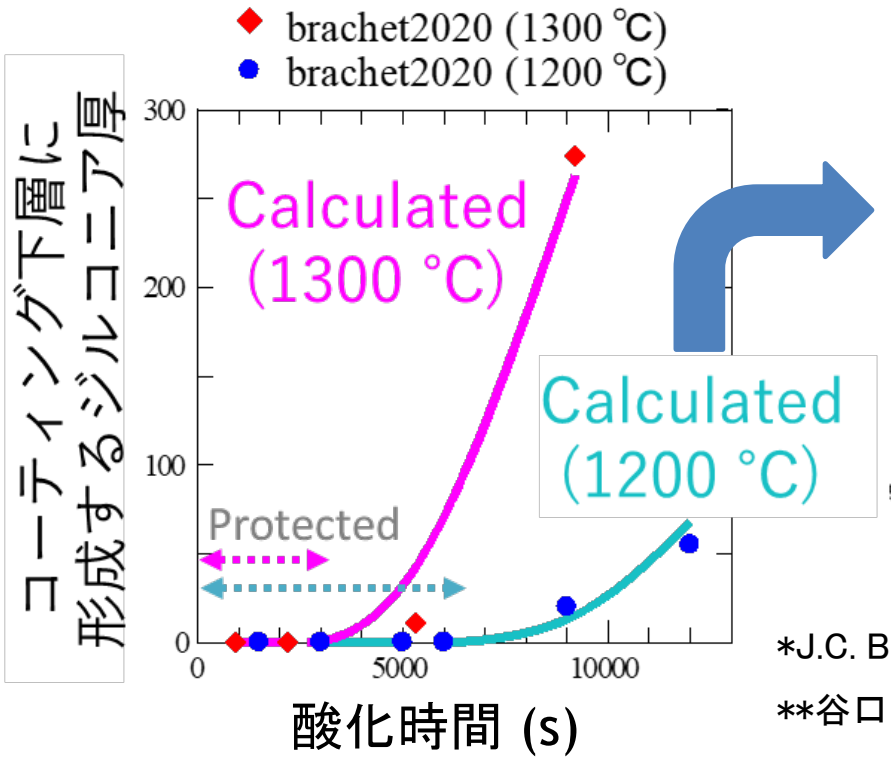
参考）計算される反応速度は…
1306℃→0.022μm/sec
1325℃→0.4μm/sec（最大）

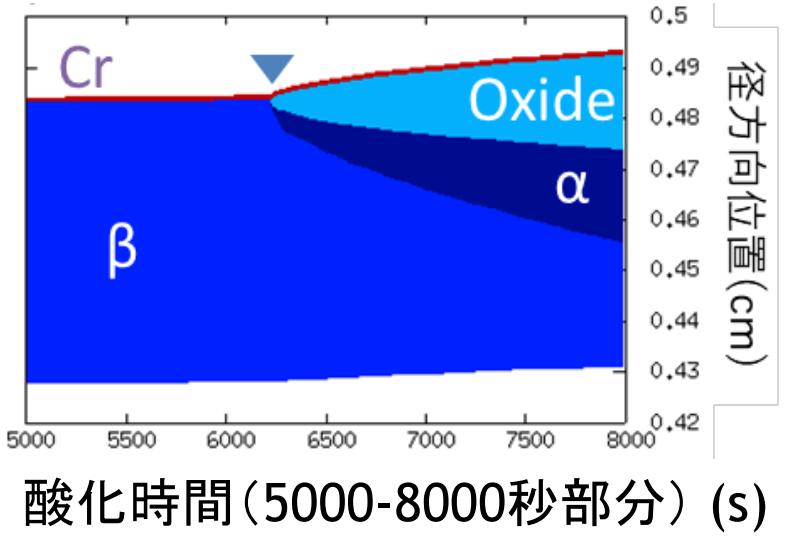
* D. Kim. et al., Nucl. Eng. Technol. 55, 3535-3542 (2023).

** 田崎雄大　他. 事故耐性燃料開発に関するワークショップ. 東京. (2024).

高温酸化モデルの動作確認（片面酸化）

- CCZの片面酸化試験を対象にコーティング下層に形成するZrO_2について、測定値と解析値の比較を行った。





*J.C. Brachet, et al., J. Nucl. Mater. 533, 152106 (2020).

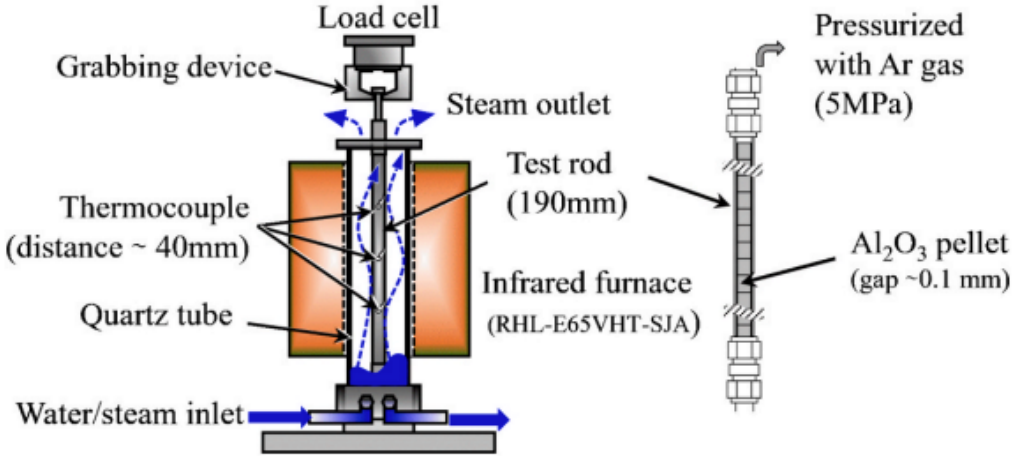
**谷口良徳 他. 日本原子力学会2023年秋の大会. 愛知. (2023).

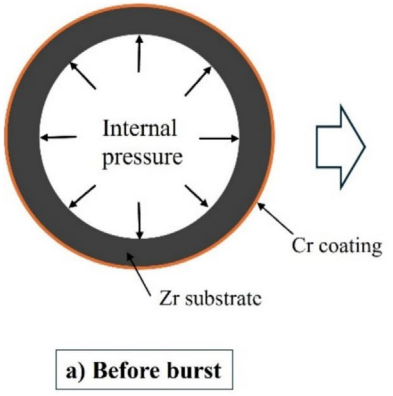
✓ 開発したモデルを備えたFEMAXIによる高温酸化試験*の解析によって、<u>コーティング層へのZrの侵入に係るパラメータを決定</u>、動作を検証**した。

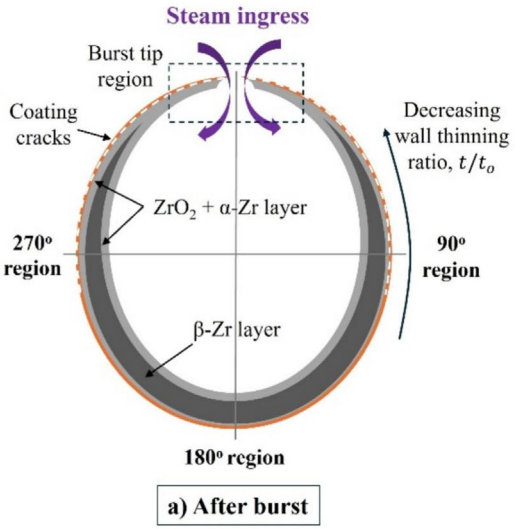
✓ Zr浸食挙動モデルの導入により保護性能喪失挙動を再現できた。

高温酸化モデルの動作確認（両面酸化の概要）

- CCZの両面酸化試験（バースト&クエンチ試験）を対象に母材中の酸素濃度について、測定値と解析値の比較*を行った。

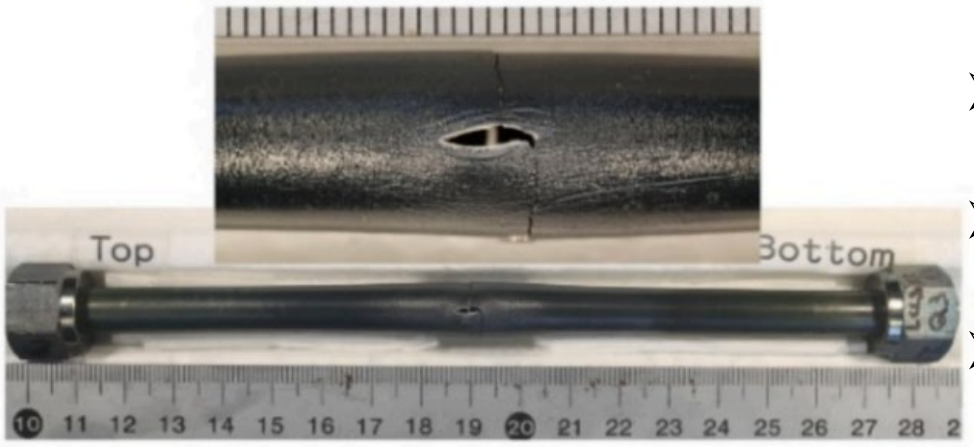






＊ Vu-Nhut. Luu. et al., ANE. 230, 112114 (2026).

1200℃/328s保持、クエンチにより破断↓

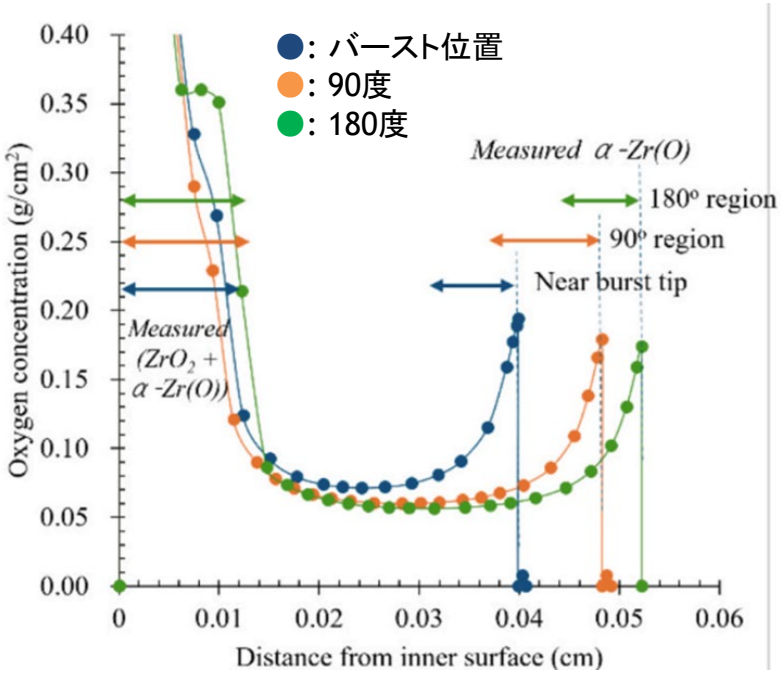


- 100%水蒸気条件
- バースト後に更に昇温し、1200℃又は1300℃で等温酸化、その後クエンチ
- 開口部（0度）,90度,180度位置で酸化膜及び相変態の状態を確認
- Vickers硬さ試験から換算することで、被覆管径方向の酸素濃度を評価
- 3つの位置における被覆管肉厚等を全周に適用して解析する。（1試験ケースで3解析）

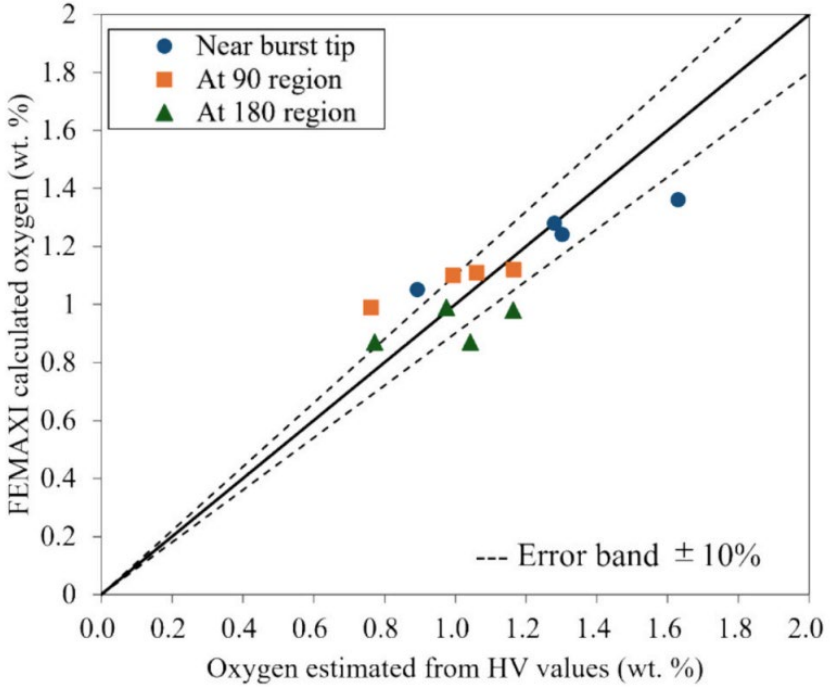
高温酸化モデルの動作確認（両面酸化試験の解析結果）

➢ 先述のCCZ高温酸化モデルを組み込んだFEMAXIで解析*した。

* Vu-Nhut. Luu. et al., ANE. 230, 112114 (2026).



被覆管径方向酸素濃度分布

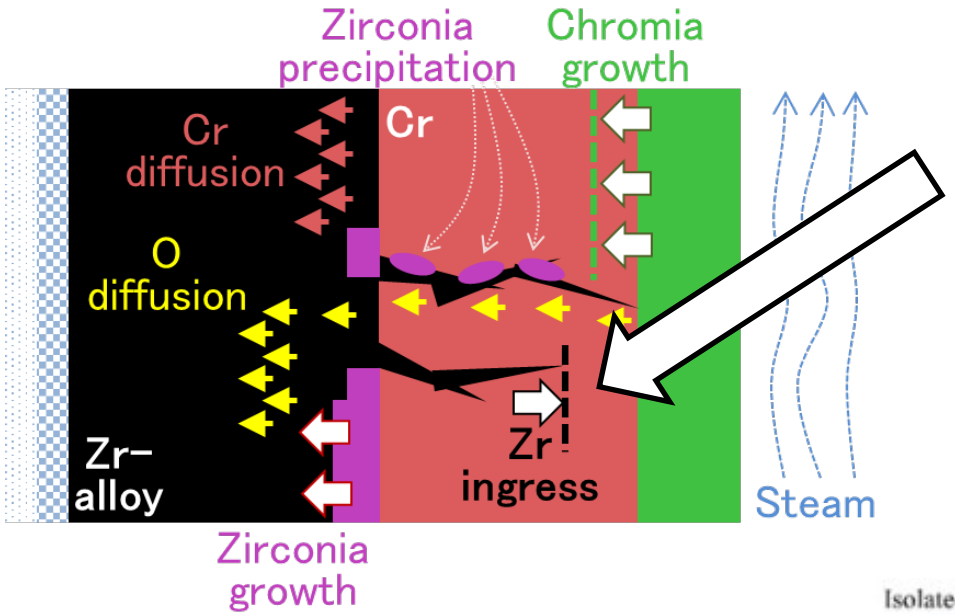


被覆管肉厚中心位置における酸素濃度評価

✓ 被覆管外表面では、コーティングの劣化が起きつつも酸素の拡散が抑えられるため、内面側と比べて酸素濃度は低くなる。これは金相観察から得られたZrO_2とα-Zr(O)の分布の傾向を再現している。

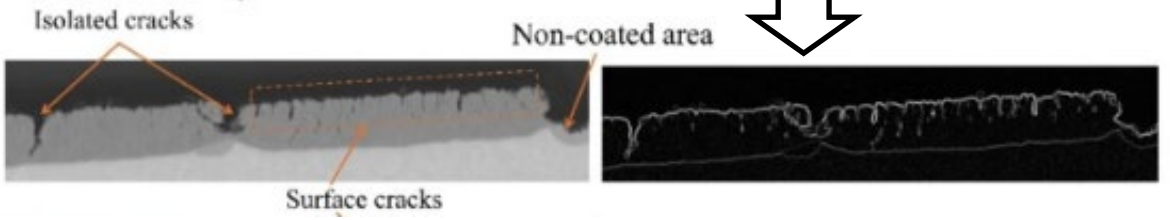
✓ 肉厚中心付近の酸素濃度評価に系統的な過大・過小評価は見られなかった。
（クエンチ時の破断発生には残存β相厚さが関係するため、肉厚中心の酸素濃度を比較）

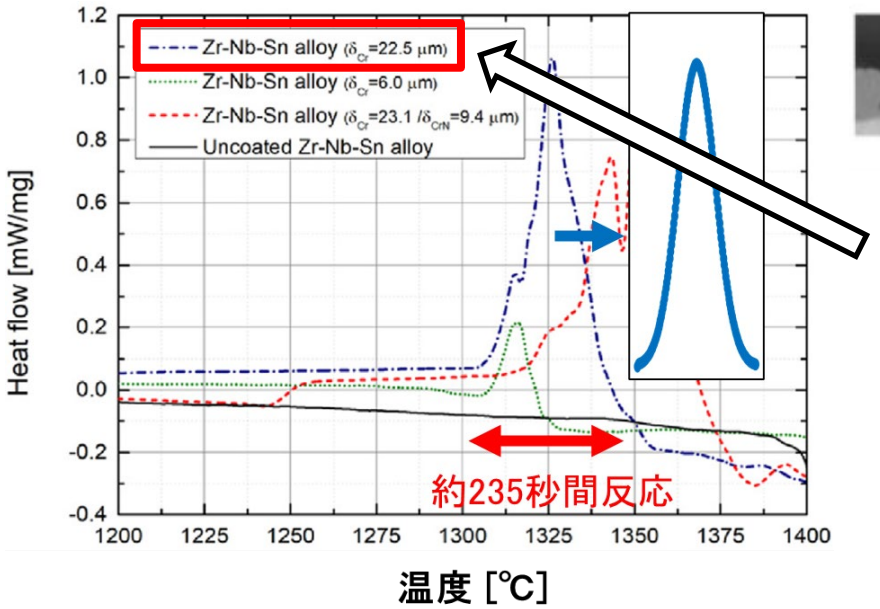
現状認識しているモデル課題（一例）



本モデルではCrコーティングの劣化（早い酸素拡散）がZr ingressの進行に強く依存するとしているが、その場合、Crの粒径・形状も重要なファクタになるはずであり、一方でこれらの効果は現在のモデルに入っていない。

高温破裂試験ではバルーニングによりコーティングに割れが生じるが、現在のモデルに割れの効果は入っていない。





現在の共晶反応モデルは、あるコーティング厚さと昇温速度で行われた試験1ケースのみを基に作成されているため、本モデルを他の設計・試験条件へ適用する際の不確かさは大きい。

⇒ 各SWGへのフィードバック
（「〇〇に注目した試験が更に必要」など）

活動案と期待される成果物（CCZ高温酸化挙動の場合）

- 検証規模の拡大、課題抽出、必要なモデルの拡充に取り組む。（短期）
  - → 皆様からも意見を聴衆し、漏れなく課題整理することが重要。
  - → JAEAが上記の取り組みに努める一方、試験数を早期に増やすのは難しい。
  - → ATFに係る試験は国内外の様々な機関で実施されている可能性があり、SWGでこれらの情報や得られた知見を集約することで取り組みを加速できる可能性。

- 各SWGで行われるPIRT活動を解析面からフィードバックする。（中期）
  - → 特にRT（影響レベル）は感覚的な評価になりやすいため、例えばFEMAXIを用いた感度解析で影響度の定量化を行う。

成果物：解析によって補強された各材料PIRT結果

- モデルの拡充・検証が進んだFEMAXIを用いた解析を議論の足場として、従来材との酸化挙動の違いを整理し、CCZ向けの合理的な安全要求を検討する。（長期：2030年）
  - → 保護性能がある以上、従来材向けに良く使われているBJ-ECRの考え方をそのまま使用することはできない。
  - → 検討内容としては、妥当なECRの評価手法、ECRでない考え方？、BJ-ECRと比較した保守性などが考えられる。（→CCZ-LOCA基準SWG？）

成果物：CCZ向け酸化評価指針、指針の根拠となる共通技術基盤としてのFEMAXI