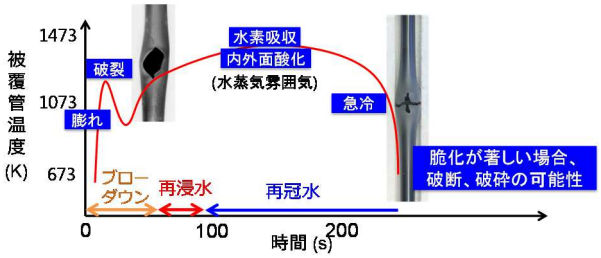
冷却材喪失事故時の燃料被覆管急冷破断限界の不確かさ評価[1,2)]

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　成川 隆文

冷却材喪失事故（LOCA）時の燃料ふるまい

- LOCA時の被覆管の酸化による脆化が著しい場合、非常用炉心冷却系（ECCS）の作動による急冷時に被覆管が破断し、炉心の冷却性を阻害する恐れがある。



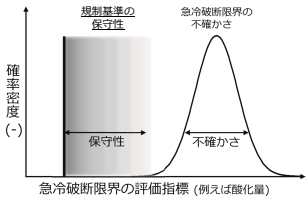
想定大破断LOCA時の燃料被覆管の温度変化と挙動の例

燃料被覆管急冷破断限界評価の課題と研究の目的

- LOCA時の燃料に関する現行規制基準は保守的な条件で実施した実験結果に依拠
  ⇒LOCA時の燃料に係る安全規制の更なる信頼性向上には、実験と評価に由来する急冷破断限界の不確かさの定量的評価が不可欠
- **本研究の目的**
  - ✓ **急冷破断限界の不確かさの定量的評価手法の開発**
  - ✓ **不確かさを考慮した急冷破断限界の評価**

目　的：被覆管の著しい脆化を防ぎ、炉心の冷却が可能な形状を維持
基準値：**燃料被覆最高温度：1200℃以下**
酸化割合(ECR)：被覆管厚さの15%以下
根　拠：急冷時に被覆管が破断しない酸化条件

LOCA時の燃料に関する現行規制基準（ECCS性能評価指針）



急冷破断限界の不確かさと規制基準の関係

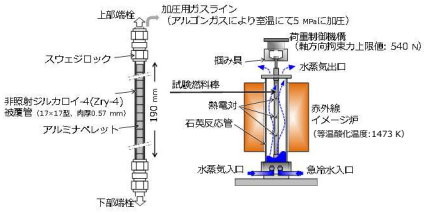
非照射ジルカロイ-4被覆管の急冷破断限界の不確かさ評価

LOCA時の脆化挙動や急冷破断限界に関する従来知見が豊富な非照射ジルカロイ-4被覆管について、急冷破断限界の不確かさを評価

提案手法

- LOCA模擬急冷破断試験により得られる被覆管の破断/非破断に関する二値データがベルヌーイ分布に従うと仮定
- 一般化線形モデル（probit, logit, log-probit）を適用し、ベイズ推定によりECRを説明変数とした急冷破断確率評価モデルを構築

⇒ 情報量規準（WAIC, WBIC）[3,4)]を用いたモデル選択の結果、将来得られるデータに対する予測精度と既に得られたデータへの当てはまりの良さの観点から、log-probitモデルが最も適していた。



試験燃料棒及び試験装置の概要

Log-probit モデル

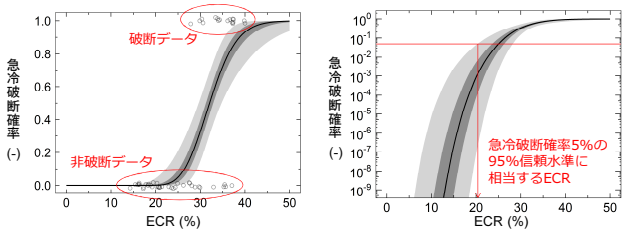
$$Y_i \sim \mathrm{Bernoulli}(\mathrm{P_{LP}}(\mathrm{Y_i} = 1|\mathbf{X_i})),$$

$$P_{LP}(Y_i = 1|\boldsymbol{X_i}) = \Phi(\beta_{LP0} + \log X_{1i}\,\beta_{LP1}).$$

Y_i　：破断/非破断に関する二値データ
P_{LP}　：急冷破断確率
Φ　：標準正規累積分布函数
β_{LP0}, β_{LP1}：未知の回帰係数（ベイズ推定により評価）
X_{1i}　：等価被覆酸化量(ECR)に関する説明変数

結果・考察

- 急冷破断確率5%の95%信頼水準を不確かさを考慮した急冷破断限界と定義
- 不確かさを考慮した急冷破断限界に相当する酸化条件は20%ECR



非照射ジルカロイ-4 被覆管の急冷破断確率とECR の関係
（実線、濃い灰帯及び薄い灰帯はそれぞれベイズ予測区間の中央値、50%区間及び95%区間）

水素添加ジルカロイ-4被覆管の急冷破断限界の不確かさ評価

高燃焼度燃料被覆管の急冷破断限界の不確かさを定量的に評価するため、通常運転中に生じる被覆管の腐食及び水素吸収を模擬して減肉加工及び水素添加した非照射ジルカロイ-4被覆管の急冷破断限界の不確かさを評価

提案手法

- 非照射の水素添加ジルカロイ-4被覆管に対するLOCA模擬急冷破断試験の文献値[5)]を使用
- log-probit モデルを改良し、ECRと初期水素濃度*を説明変数とした急冷破断確率評価モデルを構築

*通常運転中に被覆管に吸収される水素の濃度

改良log-probitモデル

$$Y_i \sim \mathrm{Bernoulli}(\mathrm{P_{MLP}}(\mathrm{Y_i} = 1|\mathbf{X_i})),$$

$$P_{MLP}(Y_i = 1|\boldsymbol{X_i}) = \Phi\left(\beta_{MLP0} + \log X_{1i}^{*}\,\beta_{MLP1} + \log\left(\frac{X_{2i}}{10^4} + \gamma\right)\beta_{MLP2}\right),$$

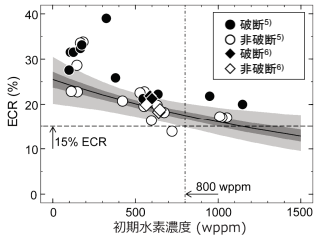
$$X_{1i} \sim Normal(X_{1i}^{*}, 0.1X_{1i}^{*}),$$

$$\gamma = 1.$$

Y_i　：破断/非破断に関する二値データ
P_{MLP}：急冷破断確率
Φ　：標準正規累積分布函数
$\beta_{MLPj}\ (j = 0,1,2)$　：未知の回帰係数（ベイズ推定により評価）
X_{1i}^{*}　：ECRに関する潜在変数
X_{1i}　：ECRに関する説明変数
X_{2i}　：初期水素濃度に関する説明変数

結果・考察

- 不確かさを考慮した急冷破断限界に相当する酸化条件は800 wppmまでの初期水素濃度範囲で15%ECRよりも高い。
- この酸化条件において被覆管は破断せず
  ⇒高い信頼性をもって被覆管が破断しない酸化条件に相当すると考えられる。



非照射の水素添加ジルカロイ-4被覆管の不確かさを考慮した急冷破断限界とLOCA 模擬急冷破断試験結果の文献値
（実線、濃い灰帯及び薄い灰帯はそれぞれ急冷破断確率5%の中央値、50%区間及び95%区間）

まとめ

- LOCA時の燃料に係る安全規制の更なる信頼性向上を目的に被覆管急冷破断限界の不確かさを確率として定量的に評価する手法を開発
- この手法により非照射ジルカロイ-4 被覆管の急冷破断限界の不確かさを定量的に評価した結果、不確かさを考慮した急冷破断限界に相当する酸化条件は800 wppmまでの初期水素濃度範囲で15%ECRよりも高いことが分かった。
  - ✓ 得られた成果はLOCA時の炉心の冷却可能形状維持のための判断基準の定量的根拠として活用できる。

【謝辞】　本成果は東京大学大学院工学系研究科 山口 彰 教授、張承賢 助教のご指導により得られたものである。深く感謝いたします。

【出典】　1) Narukawa T. et al., JNM, vol. 499, pp. 528-538 (2018).　2) Narukawa T. et al., NED, vol. 331, pp. 147-152 (2018).
3) Watanabe S., JMLR, vol. 11, pp. 3571-3594 (2010).　4) Watanabe S., JMLR, vol. 14, pp. 867-897 (2013).
5) Nagase F. and Fuketa T., JNST, vol. 42, pp. 209-218 (2005). 6) Cabrera A. and Waeckel N., proc. TopFuel 2015 (2015).