より高度な軽水炉利用に向けた燃料安全研究

－原子炉安全性研究炉NSRRを用いた事故時燃料挙動の解明－

(独)日本原子力研究開発機構
安全研究センター
原子炉安全研究ユニット
燃料安全研究グループ

杉山 智之

平成23年1月14日
平成22年度 安全研究センター成果報告会

発表内容

1. 軽水炉および燃料の高度化
2. 反応度事故時の燃料挙動研究
3. 反応度事故に関する現行基準
4. 基準の高度化に向けた取り組み
5. まとめ

今日進められている軽水炉の高度利用

- 燃料の高燃焼度化*

  燃料をさらに長期間使用することで、使用済燃料発生量の低減および燃料経済性の向上を図る。
  （現在の集合体平均燃焼度の上限：55 MWd/kg → 60以上）
  * 燃焼度：燃料がそれまでに発生したエネルギーを表す。使用期間に比例。

- 長サイクル運転

  運転サイクルの長期化により設備利用率の向上を図る。
  （現在のサイクル 13ヶ月 → 例えば18ヶ月）

- 出力増強運転

  出力密度を高め、プラント寿命中の総発電量を増大させることで経済性の向上を図る。

- MOX（混合酸化物燃料）燃料の本格的利用

  ウラン資源の有効活用、高燃焼度における出力低下の割合がウラン燃料よりも小さいといったMOX燃料のメリット活用を図る。

燃焼度制限	MOX装荷率 1/3：	45 MWd/kg	→ ウラン燃料と同等に
	全炉心装荷：	40 MWd/kg	

軽水炉燃料の高度化

軽水炉の高度利用により燃料への負荷が増大するため、
安全性能を向上させるための改良が進められている。

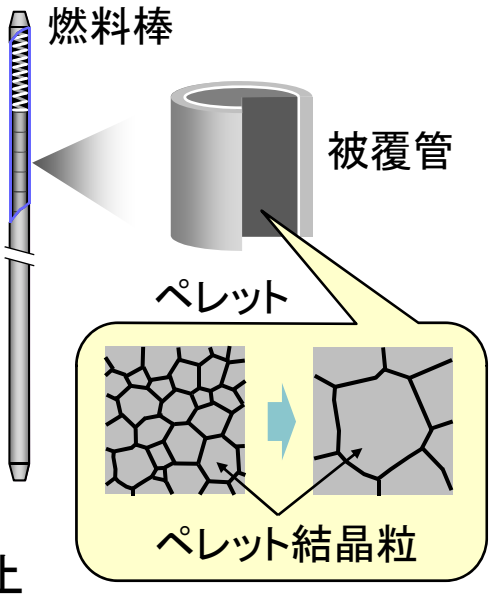
- 改良被覆管の導入

  使用期間の長期化、使用温度の上昇に対応するため、
  耐食性を向上させた新合金被覆管が開発されている。

- ペレット大粒径化

  ペレット結晶粒からの核分裂生成物（FP）の放出を抑制するため、拡散による移動距離をより長く設けるための改良、すなわち結晶の大粒径化が研究されている。

  - FPガス（Xe, Kr等）の放出による燃料棒内圧の上昇を抑制
  - よう素放出の抑制により被覆管内面の応力腐食割れを防止



- 通常運転時の安全確保は当然である。加えて、異常な状態（異常過渡、事故）についても安全性の確認が必要

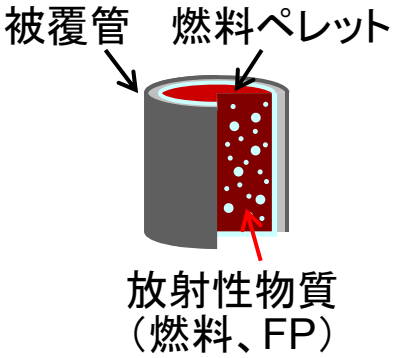
- 安全性を確認するためには技術的知見に基づく適切な判断基準が必要

設計上要求される安全性能

・通常状態
・運転時の異常な過渡変化*1（異常過渡）

- 燃料が破損しないこと
（被覆管による放射性物質閉じ込め機能の維持）

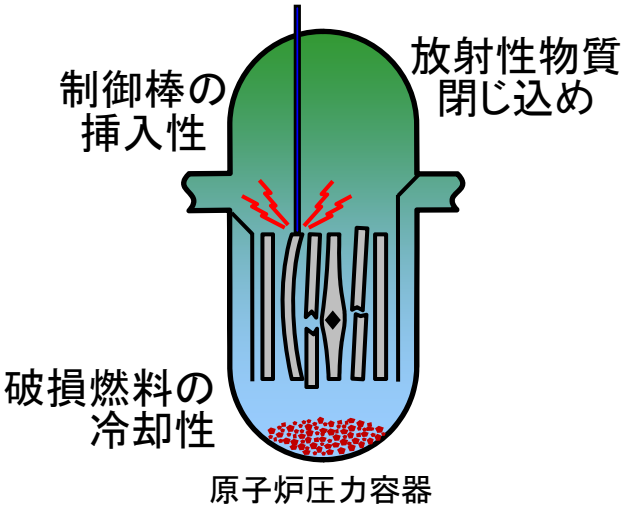
以下、「燃料の破損」＝「被覆管の破損」とする



事故*2

- 原子炉圧力容器の健全性の維持
（放射性物質閉じ込め機能の維持）
- 閉じ込め機能を維持するために、
炉心が著しく損傷しないこと
（原子炉停止能力および冷却性の維持）

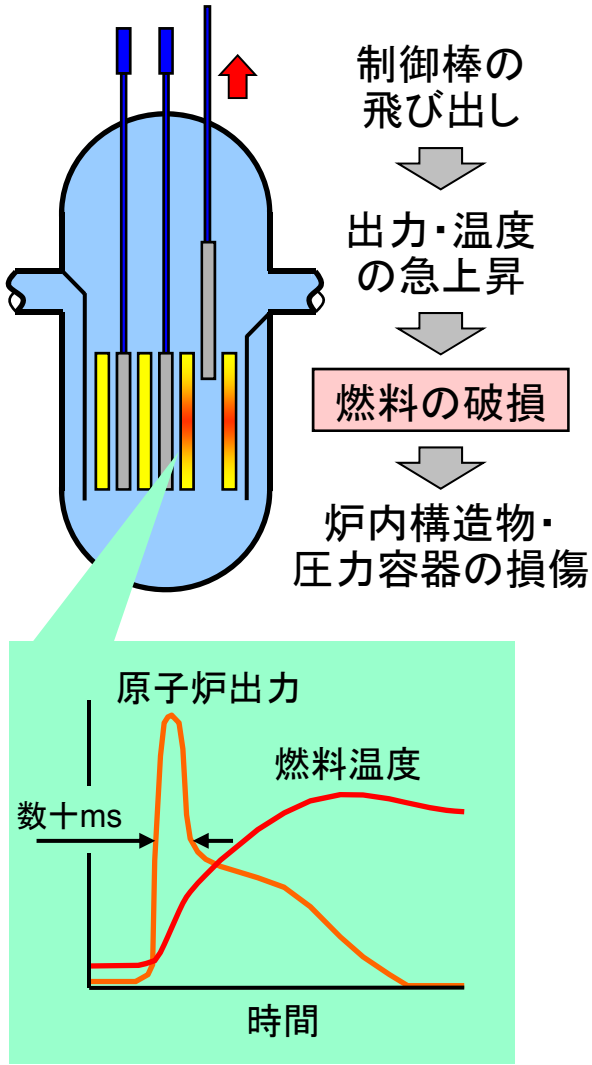
原子炉安全の原則：止める・冷やす・閉じ込める



*1 原子炉の寿命中に1回は起こると想定される単一の原因による事象。
*2 異常過渡を超える事象で、施設外への放射性物質の放出が起こり得るもの。

安全評価における想定事象：反応度事故

反応度事故（RIA）とは



過去に米国で実施された実験から、炉心や原子炉容器の損傷は、いずれも、燃料破損の結果として発生すると理解されている。

原子炉全体ではなく、燃料の挙動に着目

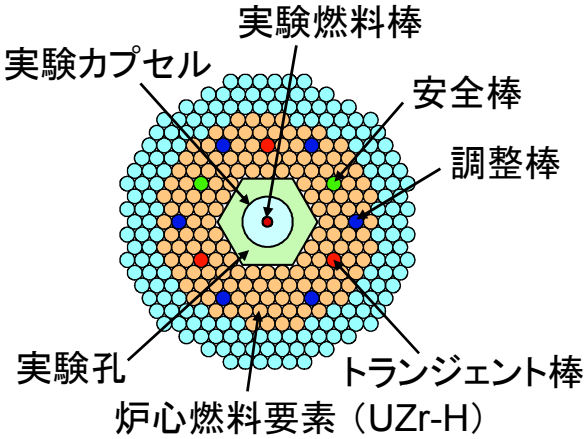
判断のために必要な技術的知見

- 燃料破損のメカニズム
- 燃料が破損に至る条件
- 燃料破損が及ぼす影響

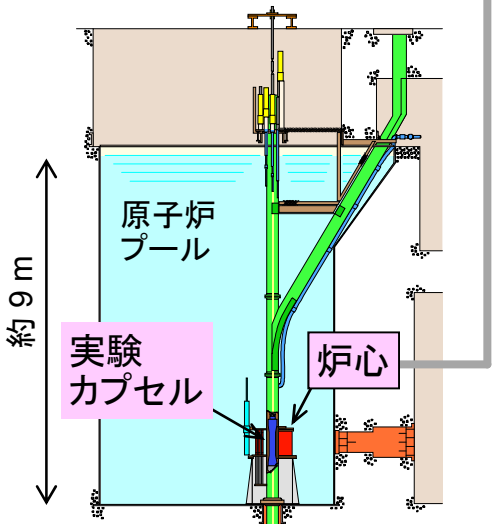
燃料の破損実験により評価

NSRRを用いた反応度事故模擬実験

NSRR: Nuclear Safety Research Reactor

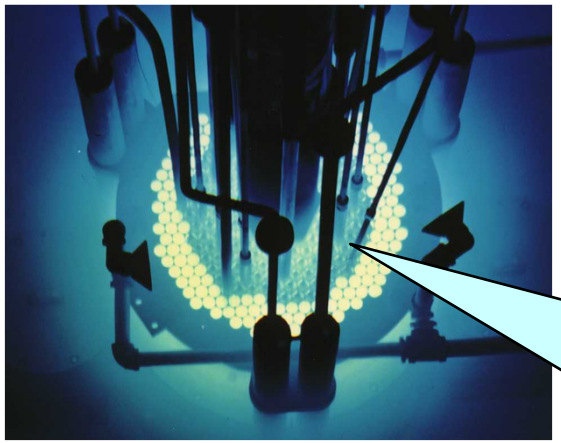


炉心の水平断面

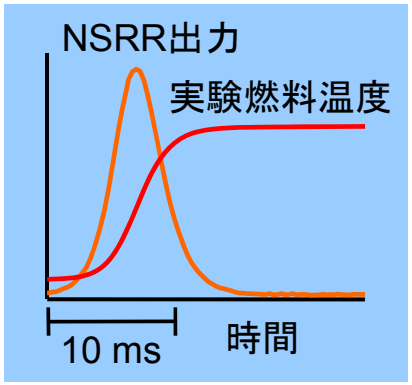


NSRRの垂直断面

原子炉安全性研究炉 NSRR のパルス出力運転により反応度事故（RIA）時の出力急上昇を模擬し、実験カプセル内に設置した実験燃料棒の過渡挙動を計測。

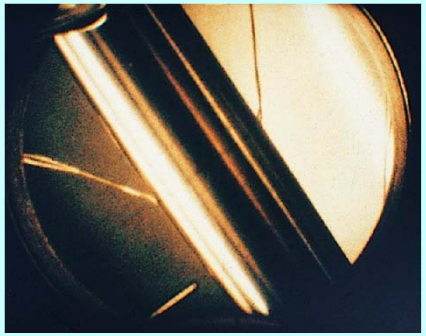


パルス運転中のNSRR外観

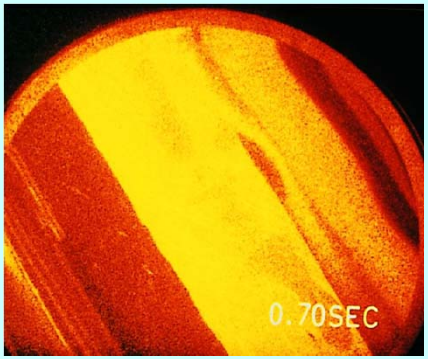


パルス出力によるRIAの模擬

実験燃料棒の様子



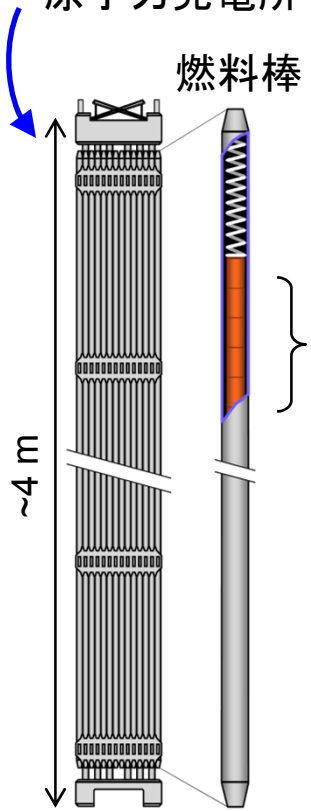
実験前



パルス運転中

照射済燃料を用いたNSRR実験

原子力発電所



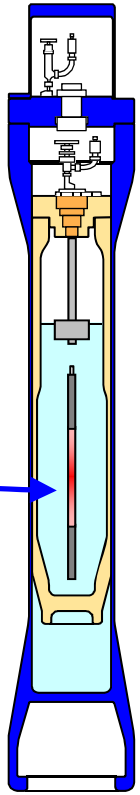
燃料集合体

実験燃料棒の製作*

実験燃料棒

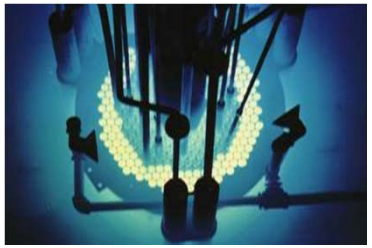
ペレットスタック
約110 mm

実験カプセル組立



実験カプセル

NSRRパルス照射実験



過渡計測

- 被覆管表面温度、冷却材温度
- 燃料棒内圧力、カプセル内圧力
- 被覆管およびペレットスタックの伸び
- 冷却水塊の飛び上がり速度
- その他

詳細な燃料検査*

- 外観検査
- 寸法測定
- X線写真
- 金相試験
- その他

* 燃料試験施設で実施

NSRRによる研究成果の安全規制への反映

集合体最高
燃焼度(MWd/kg)

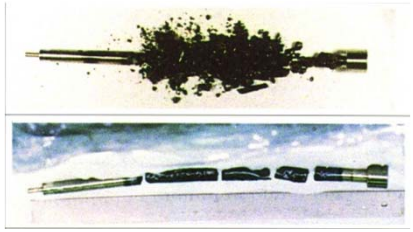
BWR ~35
40
50
55

PWR 39
48
55

・次段階の燃焼度
・新型燃料

NSRRにおけるRIA模擬実験

1975
未照射燃料実験



1989
照射済燃料実験

2010年現在の研究成果

安全規制への反映
（原子力安全委員会 指針類）

1984 発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針

高燃焼度燃料の破損しきい値

1998 発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて

科学的合理性の向上

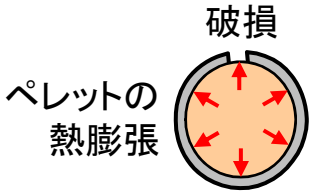
高度化に対応した新たな基準

燃焼の進んだ燃料の破損

― これまでの知見 ―

被覆管に縦割れが発生

NSRR実験で破損した燃料棒の外観

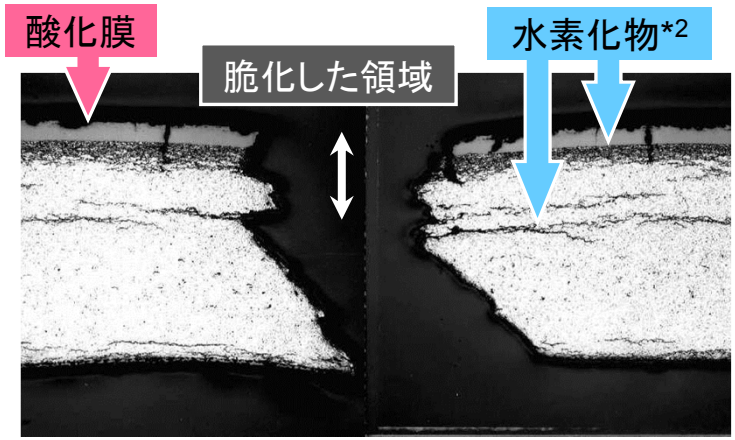


燃料棒の断面

酸化・水素化により脆化した被覆管がペレットの熱膨張により破損した。

➡ PCMI*1 破損

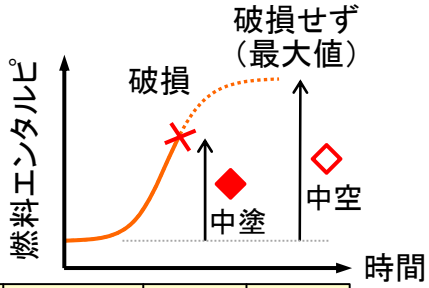
*1 ペレット被覆管機械的相互作用



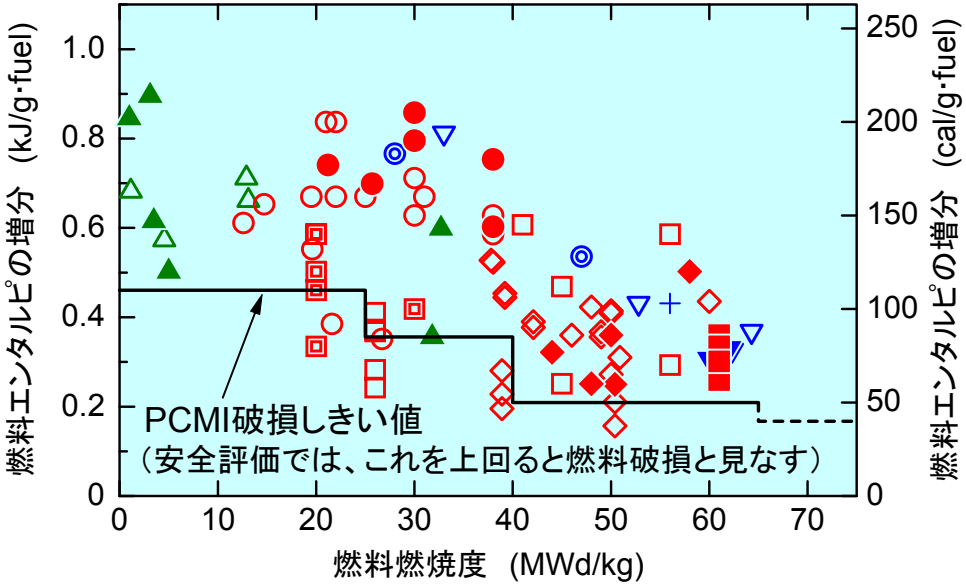
被覆管断面における破損部の拡大写真

燃料エンタルピ：
燃料が有する熱量。
燃料への負荷を表す。

【下図における記号の意味】



実験シリーズ		破損せず	破　損	実験シリーズ	破損せず	破　損
NSRR	PWR	◇	◆	SPERT, PBF	△	▲
	BWR	□	■	CABRI UO_2	▽	▼
	ATR/MOX	⧈	――	CABRI MOX	◎	＋
	JMTR*3	○	●	――	――	――



燃料破損限界と燃焼度の関係

*2 被覆管金属の固溶限界を超えた水素が析出したもの

*3 JMTRで照射した燃料に対する実験

基準の高度化に向けた取り組み

主としてPCMI破損しきい値に対して:

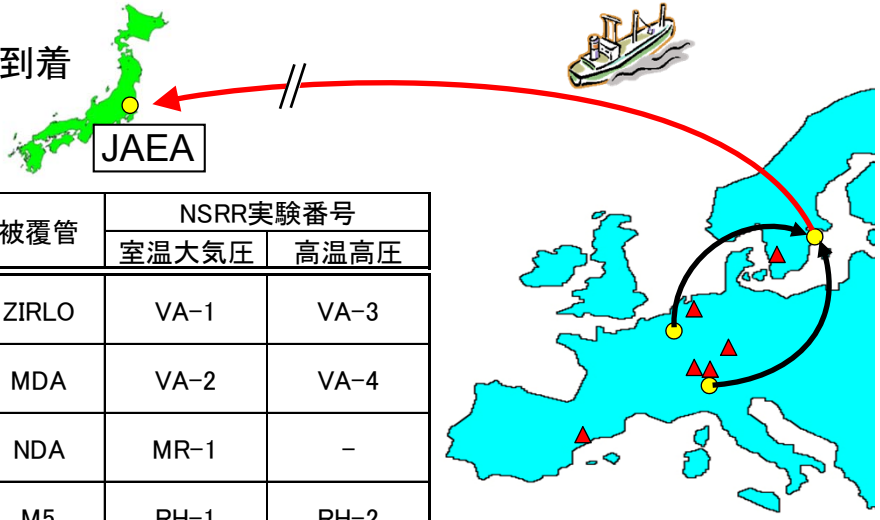
- 高燃焼度領域のデータ拡充
- MOX燃料に関するデータ取得
- 冷却材温度が破損限界に及ぼす影響の評価
  - 従来、照射済燃料を用いたNSRR実験は室温でのみ実施。
  - 運転時・高温待機時の冷却水温度（280℃以上）では被覆管脆化の影響が低減され、破損しにくいと予想される。よって、室温データに基づく現行基準は過剰に厳しい可能性がある。
- より適切な評価指標の検討
  - 近年導入された改良合金被覆管は同じ燃焼度でも酸化・水素化が少ないため、従来の被覆管より破損しにくい。しかし、燃焼度を指標とする基準では性能向上が正当に評価されない。
  - 合金の種類に依らないより普遍的な指標が望ましい。
- 燃料挙動解析コードの開発・高精度化
  - 通常時燃料挙動解析コード FEMAXI-6
  - 過渡時燃料挙動解析コード RANNS

科学的合理性向上の余地

海外で照射された高燃焼度燃料を用いた実験

現時点で国内では達成できない高い燃焼度に達したウラン燃料およびMOX燃料を欧州から日本に輸送し、各種実験を実施。（経済産業省原子力安全・保安院からの委託による「燃料等安全高度化対策事業」）

2004年9月到着



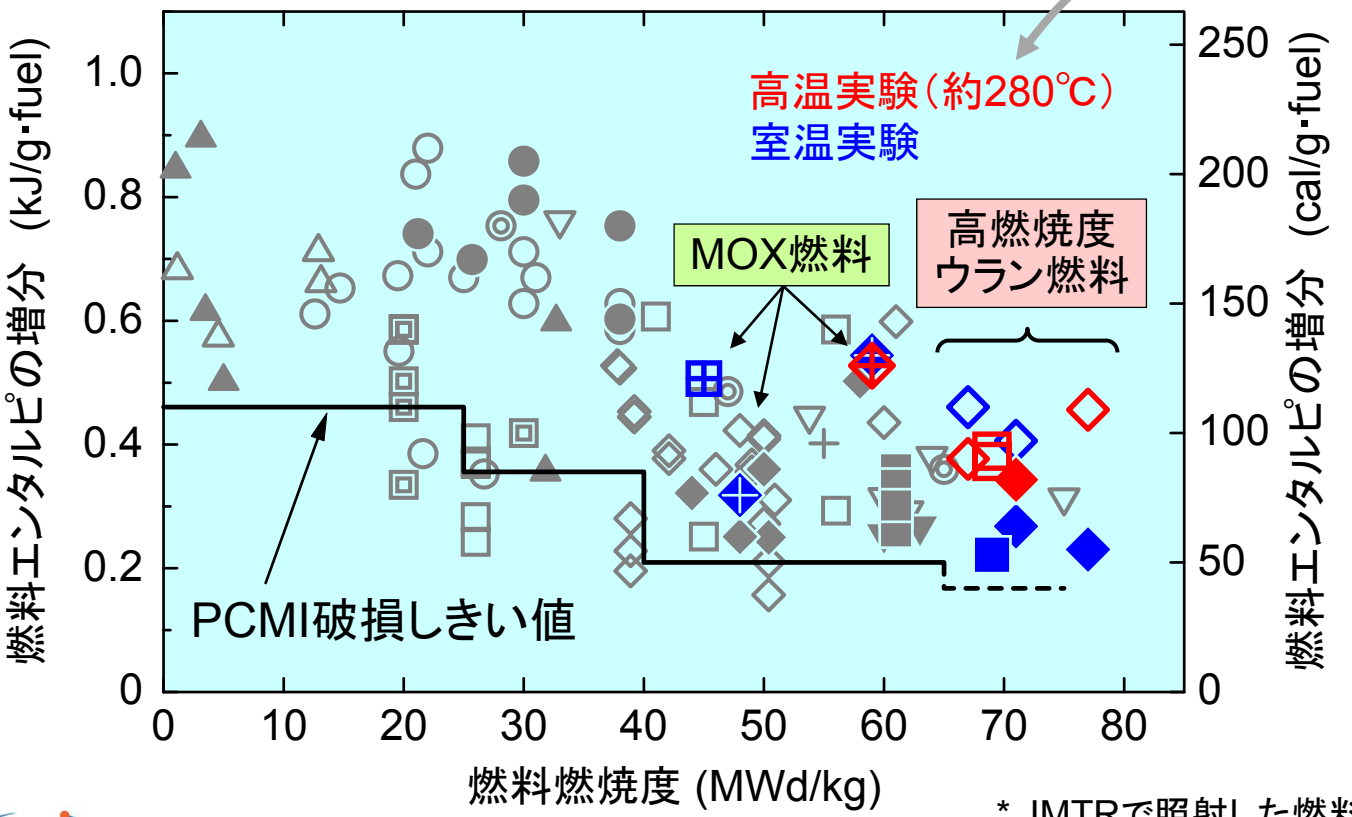
燃料タイプ			照射炉（国）	燃焼度	被覆管	NSRR実験番号	
燃料	炉型	形式		GWd/t		室温大気圧	高温高圧
UO_2	PWR	17×17	バンデロス（スペイン）	71	ZIRLO	VA-1	VA-3
				77	MDA	VA-2	VA-4
			マクガイア（米国） R2（スウェーデン）	71	NDA	MR-1	–
			リングハルス（スウェーデン）	67	M5	RH-1	RH-2
	BWR	10×10	ライプシュタット（スイス）	69	Zry-2	LS-1	LS-2
							LS-3
MOX	PWR	14×14	ベツナウ（スイス）	59	Zry-4	BZ-2	BZ-3
				48	Zry-4	BZ-1	–
	BWR	8×8	ドッドワード（オランダ）	45	Zry-2	DW-1	–
					実験数	8	6

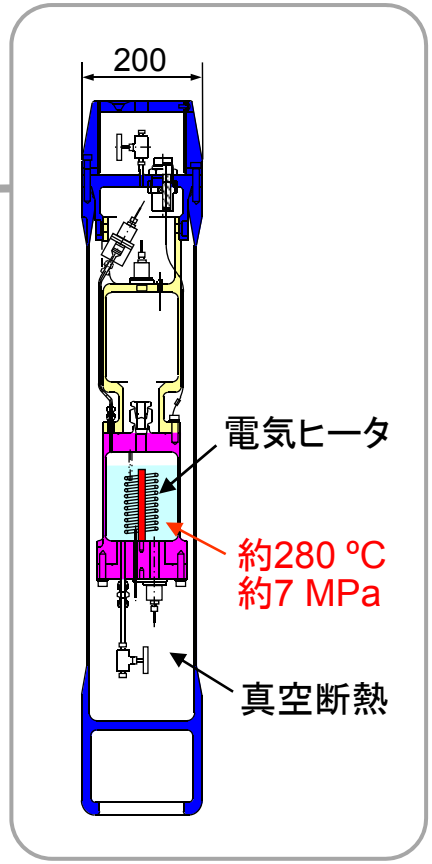
▲：原子力発電所
●：研究機関など

得られた知見(1)

ー データの拡充 ー

実験シリーズ		破損せず	破　損	実験シリーズ	破損せず	破　損
NSRR	PWR UO_2	◇	◆	SPERT, PBF	△	▲
	BWR UO_2	□	■	CABRI UO_2	▽	▼
	PWR MOX	⊕	⊕	CABRI MOX	◎	+
	BWR MOX	⊞	———	———	———	———
	ATR MOX	⊡	———			
	JMTR*	○	●			



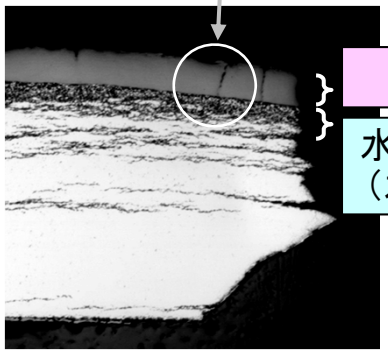


新たに開発した
高温実験カプセル

* JMTRで照射した燃料に対する実験

得られた知見(2)

― PWR燃料被覆管のPCMI破損限界に対する支配因子 ―

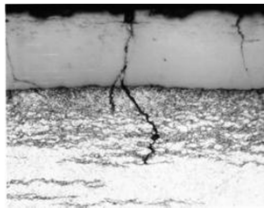


破損した被覆管の断面
（PWR燃料）

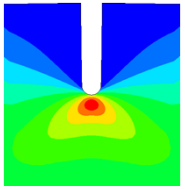
酸化膜

水素化物析出層
（水素化物リム）

未貫通のき裂から
破損直前の状態を推測



き裂先端の
応力分布
（解析結果）

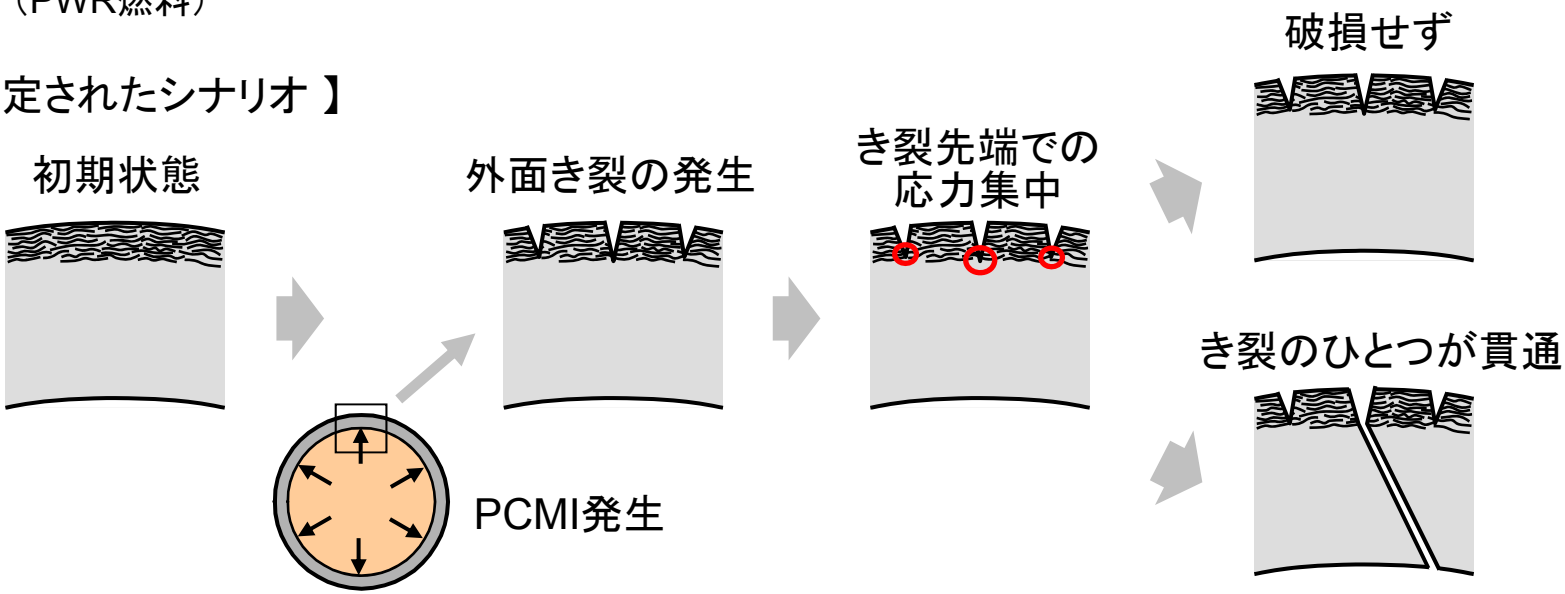


知見

応力拡大係数を決定づけるき裂の深さが重要なパラメータである。
但し、強度が低い酸化膜の寄与は無視でき、水素化物リムの厚さが支配的な因子と考えられる。

被覆管に水素化物リムのみを設けた未照射燃料による実験で、同様の破損を再現した。

【 推定されたシナリオ 】



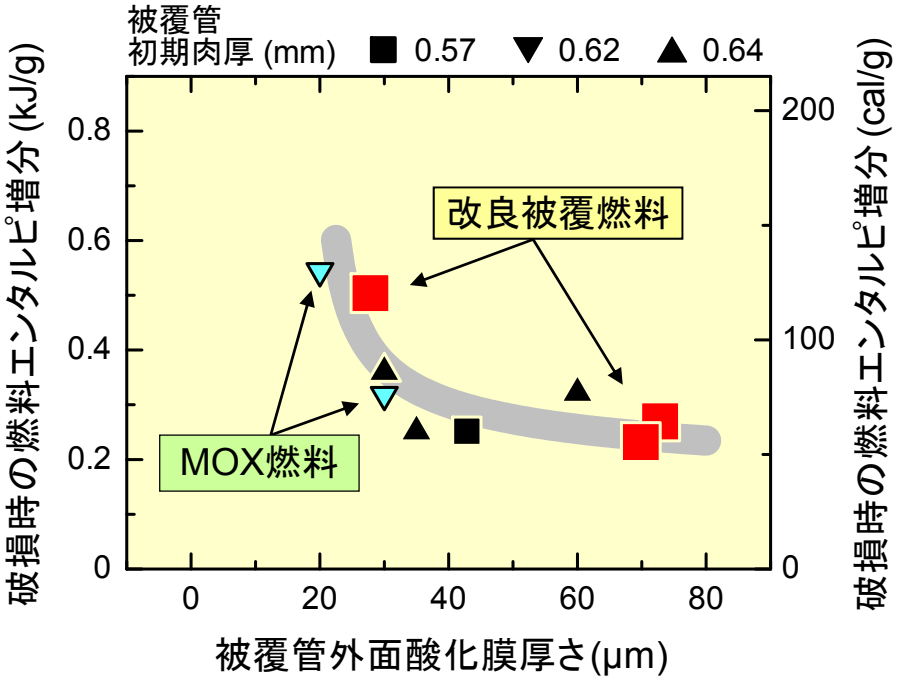
得られた知見(3)

― PWR燃料のPCMI破損しきい値に対する指標 ―

水素化物リム厚さ　破損メカニズムに直結しているが直接評価することが困難。

水素化物リム厚さ ⇔ 水素吸収量 ⇔ 酸化膜厚さ　各々がほぼ比例関係にある

外面酸化膜厚さ　強度が低いためメカニズム上は寄与しないが、計測等による評価が比較的容易であり指標として有力。



- NSRRで破損した全てのPWR燃料実験データ
- 改良被覆燃料以外はすべてジルカロイ4被覆

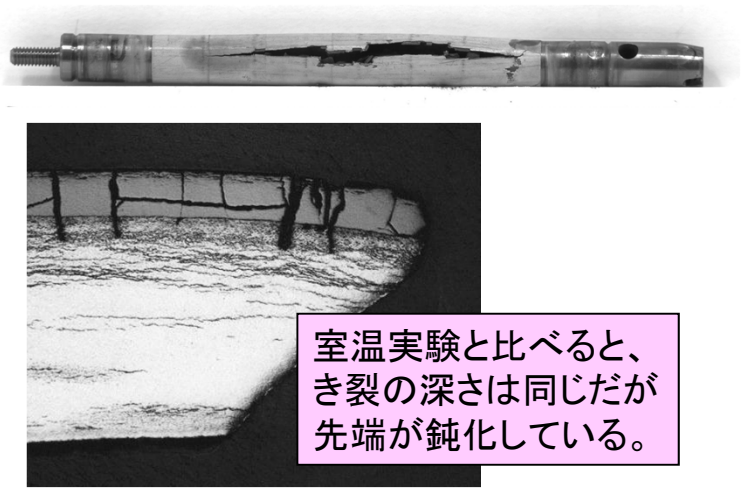
知見

- 酸化膜厚さによる整理は改良被覆燃料のデータを併せた場合でもうまく傾向を表すことができる。
- MOX燃料とUO_2燃料とでは、駆動力であるペレット熱膨張に大きな違いがなく、また破損限界が被覆管の状態で決まるため、同一傾向となる。

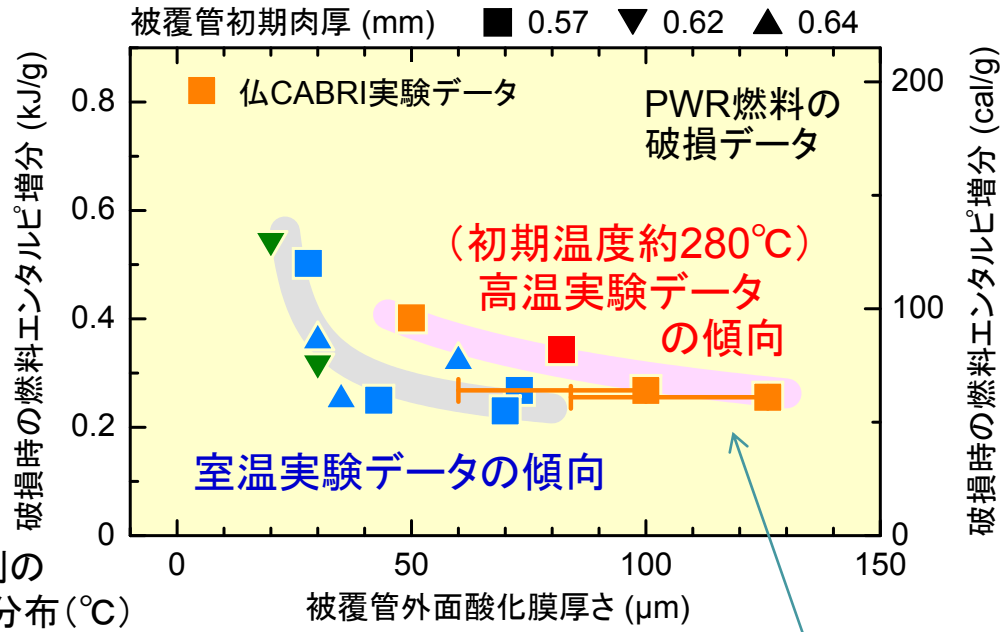
↖ 新たな指標の提案

得られた知見(4)

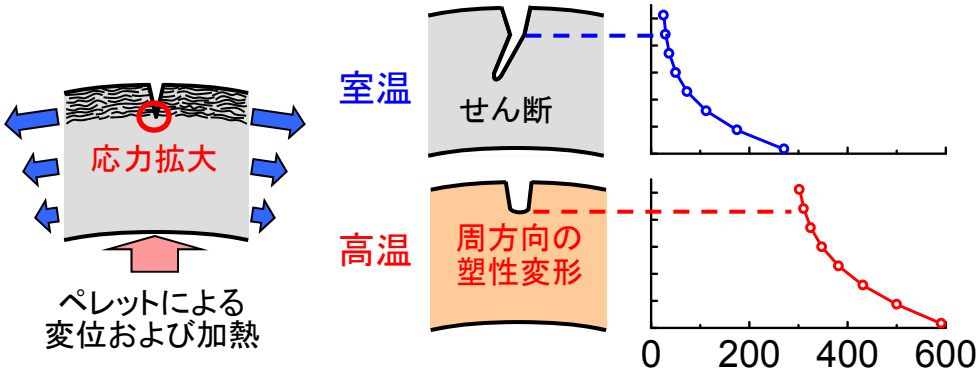
ー 冷却材温度が破損限界に及ぼす影響 ー



高温実験で破損した
PWR燃料被覆管の断面



温度条件を考慮することの提案



破損時刻の
厚さ方向温度分布（℃）

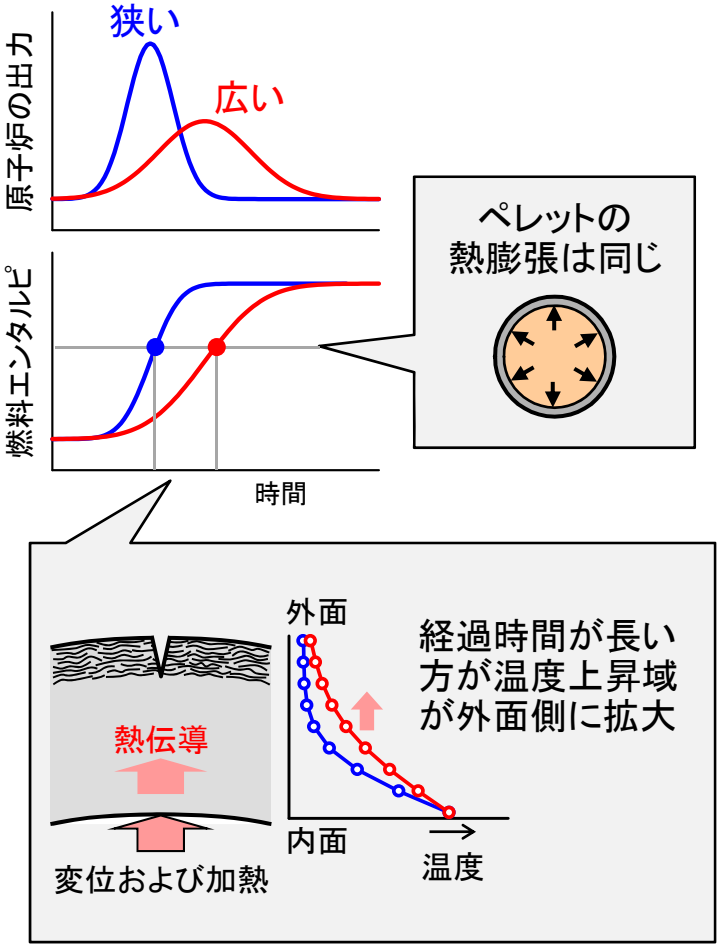
被覆管温度が高いほど
- 延性が高くなる。
- より多くの水素が固溶できる。

知見

- 酸化膜厚さが同じなら高温条件における破損限界は室温より約20cal/g高い。
- 現行の破損しきい値は室温実験結果に基づいているため、運転時・高温待機時に対しては保守的である。

得られた知見(5)

ー 出力パルス幅が及ぼす影響 ー



- NSRRの出力パルスは、実機で想定されるものよりも幅が狭い。
- 出力パルス幅が広い場合、ペレットの熱膨張が同じ大きさになるまでの時間が長いため、結果的に、被覆管のより広い範囲が高温に達する。
- 被覆管の温度が破損限界に及ぼす影響（前頁）および被覆管の熱膨張による周方向引張応力の緩和を考慮すると、出力パルス幅が広い場合には破損限界が高くなると予想される。

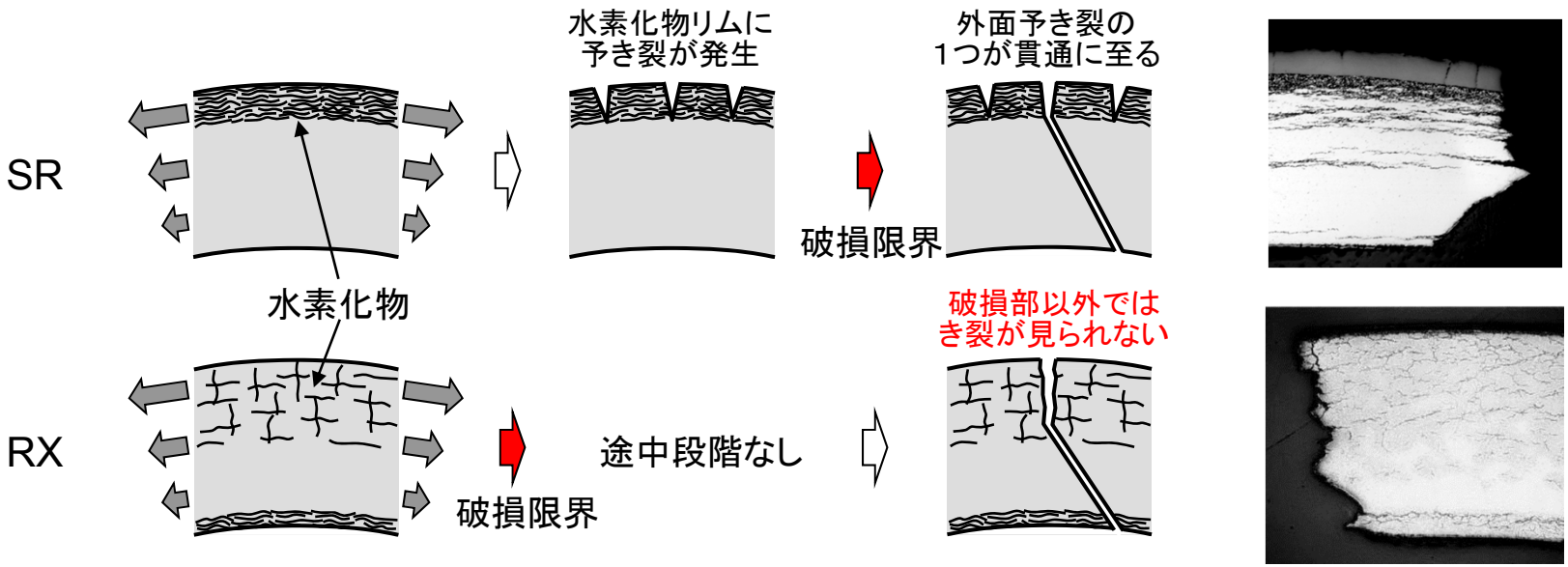
知見

被覆管の温度分布を考慮することで、狭い出力パルス幅に起因するNSRR実験の保守性を定量的に評価できる。

残されている課題

ー 被覆管の結晶組織による影響の定量化 ー

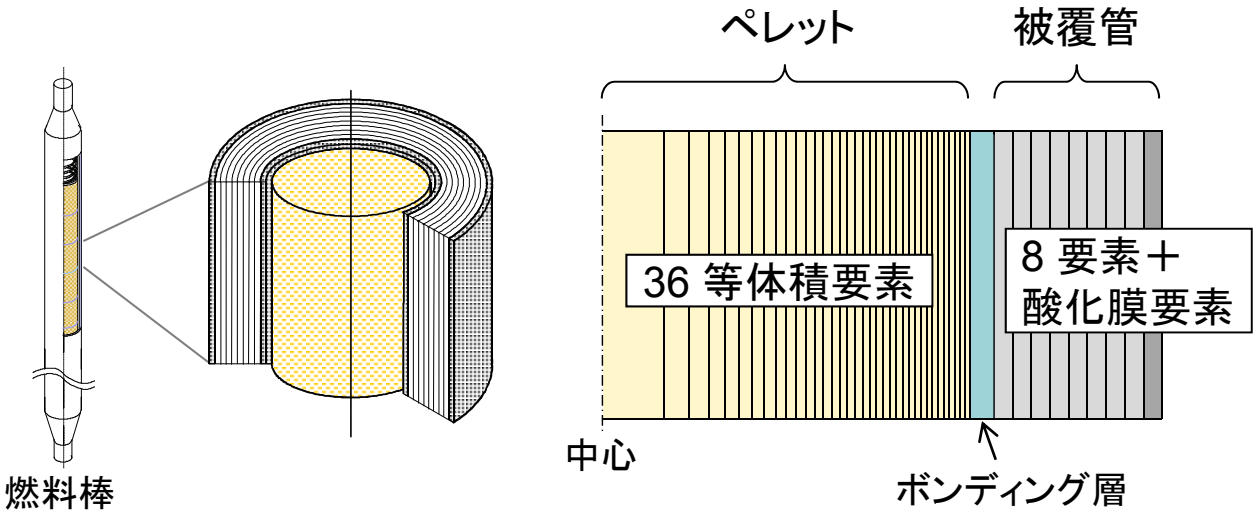
- ここまでの議論の対象：応力除去（SR）焼鈍しされたPWR燃料被覆管
- BWR燃料には一般に再結晶（RX）焼鈍し被覆管が使われている。
- 近年、PWR燃料にもRX材が使われるようになった。（AREVA製M5など）
- 結晶組織の違いにより、両者では水素化物の析出形態が異なる。
  SR材：周方向に長く成長
  RX材：SR材に比べてよりランダムな方向に析出



・RX被覆管の破損には、SR被覆管とは異なる考え方が必要。
・RX被覆管の破損データ拡充に向けて新たな実験を計画している。

今後の展望

- 蓄積した知見および今後取得する知見（被覆管の結晶組織による影響など）のすべてを、当研究グループが開発する燃料過渡挙動解析コードRANNSに反映する。
- RANNSコードの完成度を高めることで、NSRR実験で取得した破損限界データを、温度やパルス幅などに関して実機条件に変換することが可能となる。
- 変換後のデータに基づく破損しきい値の提案を目指す。



燃料過渡挙動解析コードRANNSの有限要素モデル

まとめ

- 今日進められている軽水炉の高度利用に対応した安全基準は、より多様な材料、より広範な条件に適用可能であることが求められる。そのためには、基準をより本質的・普遍的な要求で規定することが必要と考えられる。
- これまで、NSRR実験は反応度事故に関する安全基準の策定に必要なデータを提供してきた。引き続き、軽水炉の高度利用に対応した基準の整備に必要な技術知見を提供するため、海外照射燃料を用いた実験など、様々な取り組みによって知見を蓄積している。
- 知見の蓄積と発信を継続するとともに、得られた知見を活用して、安全確保と新技術導入促進の両立を実現する高い科学的合理性を備えた基準案を検討し、提示する。