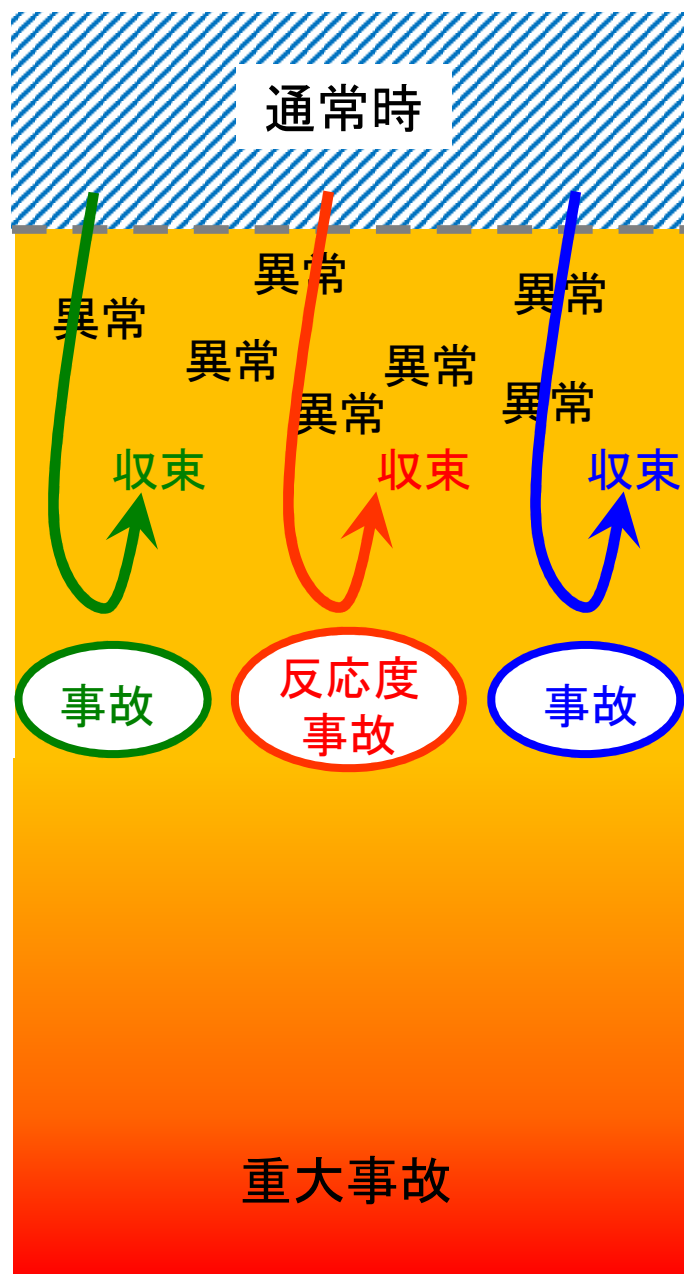


損傷力学モデルを用いた数値シミュレーションによる反応度事故時の燃料被覆管破損挙動の解明

安全研究センター 燃料安全研究グループ

宇田川 豊

軽水炉の安全評価における反応度事故の位置付け ²

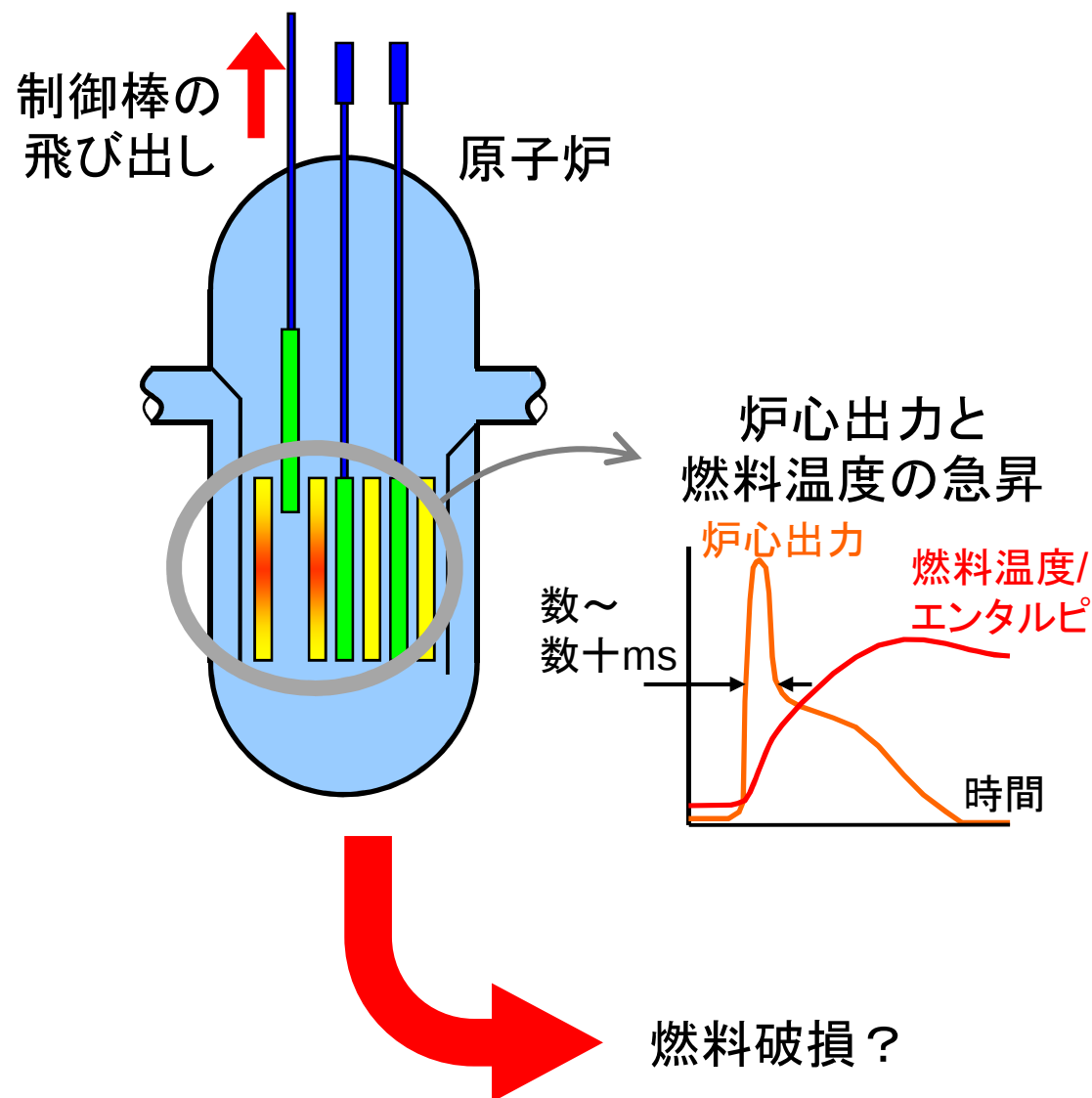


安全性(重大な事故に発展することなく収束)を確認する

原子炉の設計:

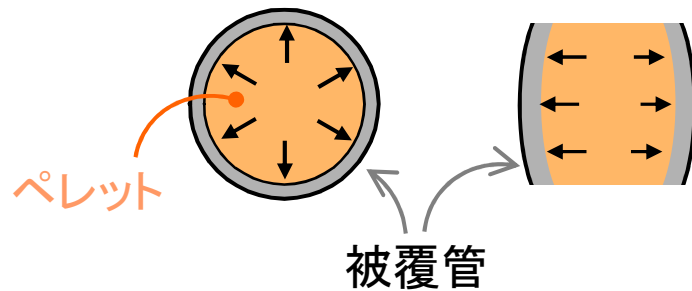
様々な**異常な状態**に対しても安全性が確保されるよう、種別が異なる異常のそれぞれについて、非常に厳しい状態を想定

反応度事故



高燃焼度燃料の場合

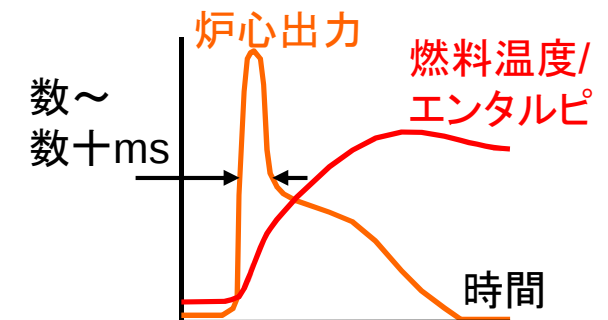
被覆管が強い負荷を受ける
(PCMI: ペレット被覆管機械的相互作用)



燃料ペレットが熱膨張

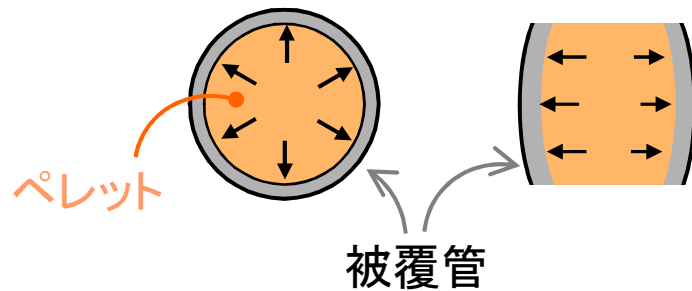


炉心出力と
燃料温度の急昇



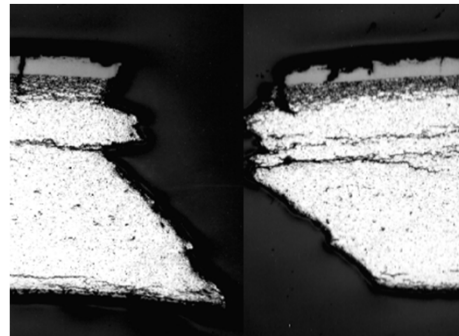
高燃焼度燃料の場合

被覆管が強い負荷を受ける
(PCMI: ペレット被覆管機械的相互作用)



PCMI破損

破損した
燃料棒

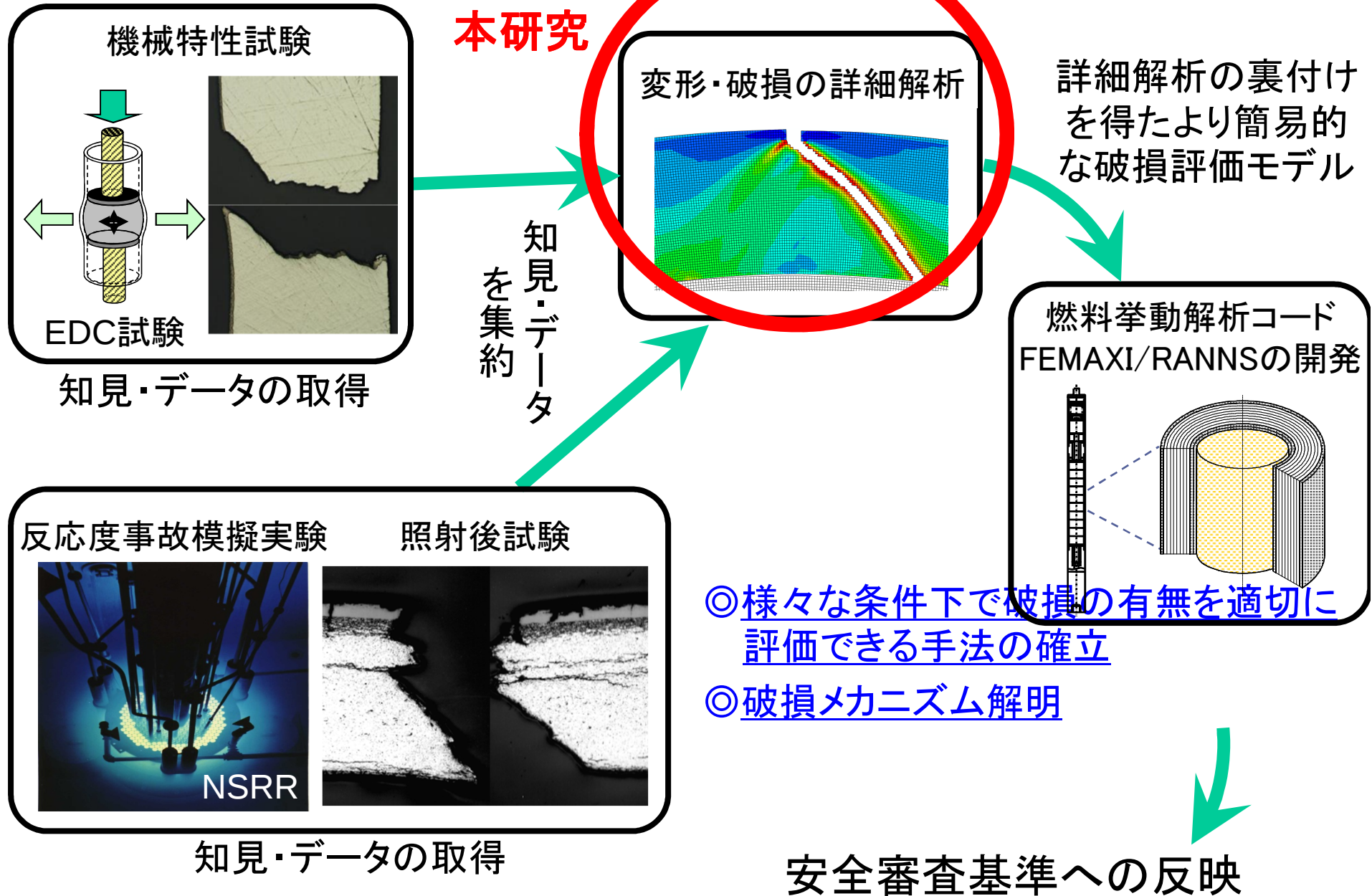


破損した被覆管の断面

高燃焼度燃料の支配的な破損モード

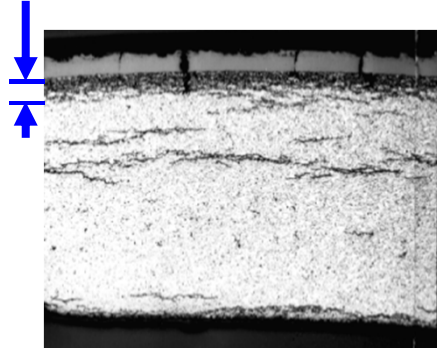
- ◎ 様々な条件下で破損の有無を適切に評価できる手法の確立
- ◎ 破損メカニズム解明

を進めることが重要な研究課題

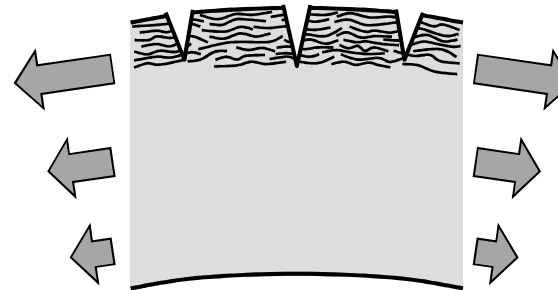


実験前後の観察から類推される破損プロセス ⁷

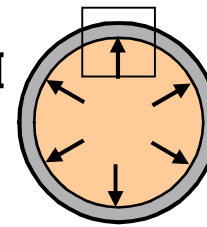
水側腐食(酸化)により
形成した水素化物リム



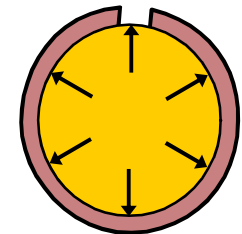
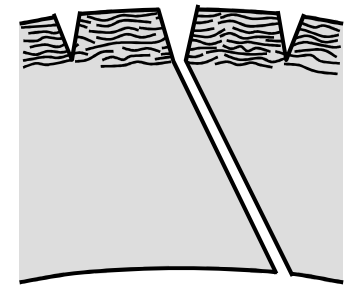
予き裂が形成



PCMI

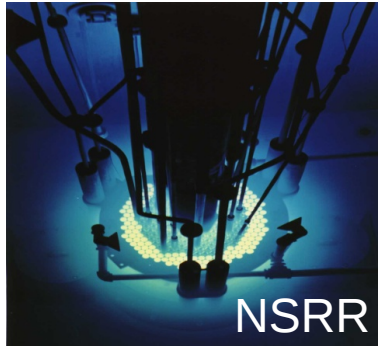


き裂が貫通



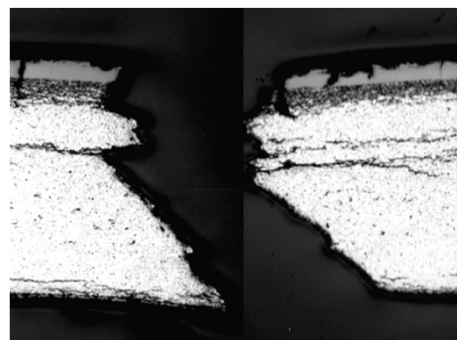
き裂深さとリム厚さに相関

反応度事故模擬実験



NSRR

照射後試験

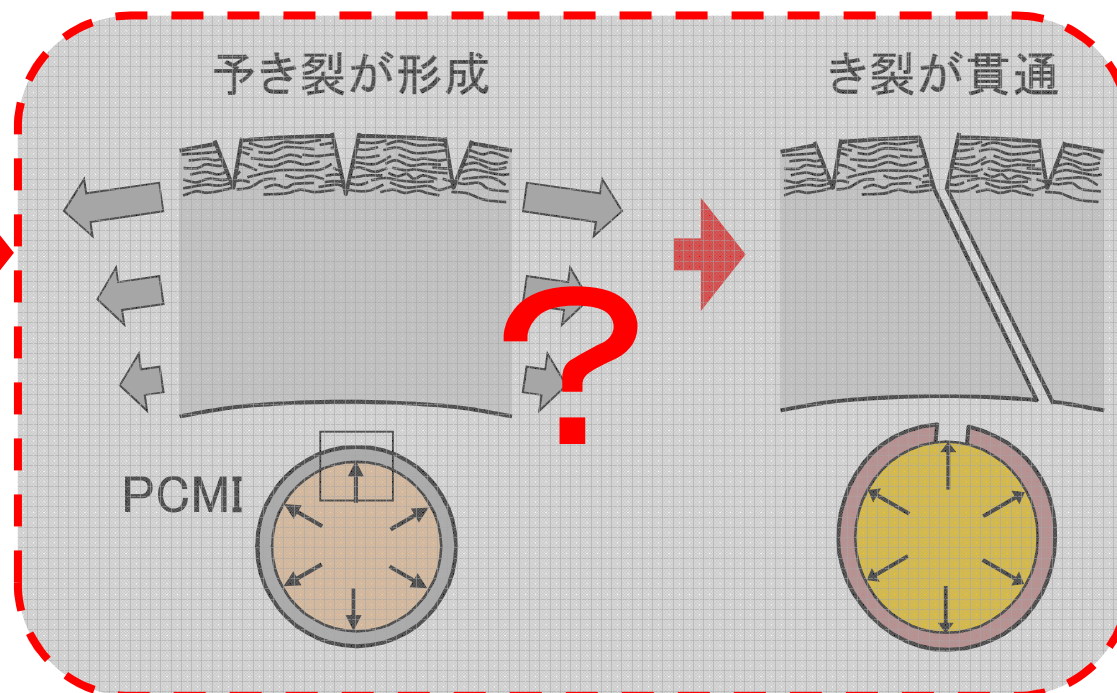
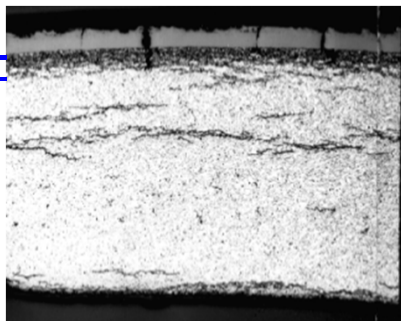


破損部以外でも複数の
外面き裂が形成

実験前後の観察から類推される破損プロセス ⁸

水側腐食(酸化)により
形成した水素化物リム

観察可



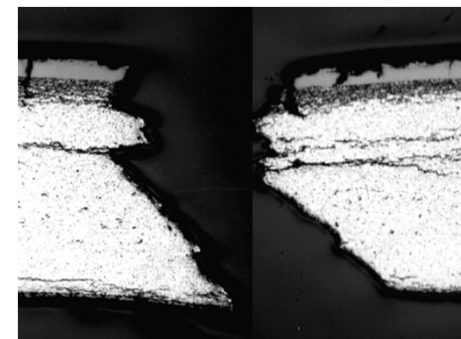
動的な破損過程の直接的な観察は不可能



連続体損傷力学モデルによる数値シミュレーション

目的

PCMI破損プロセスに関する仮説の検証と詳細過程解明

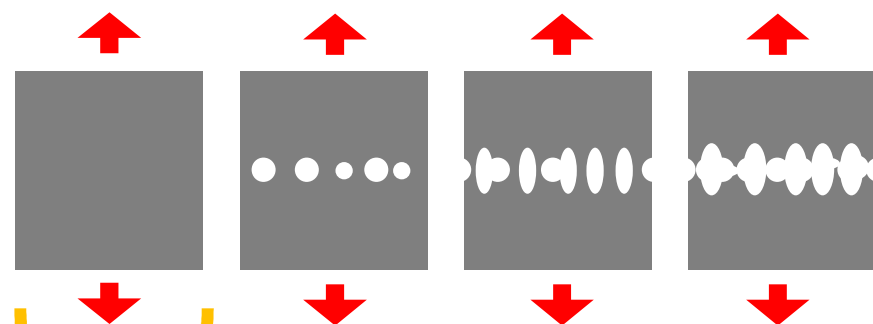


観察可



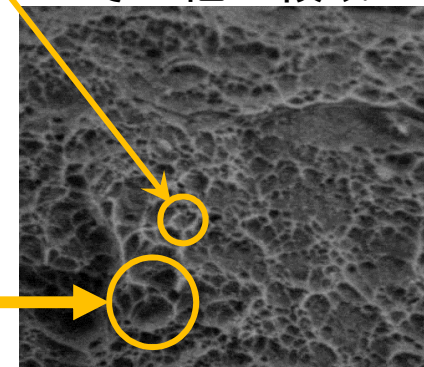
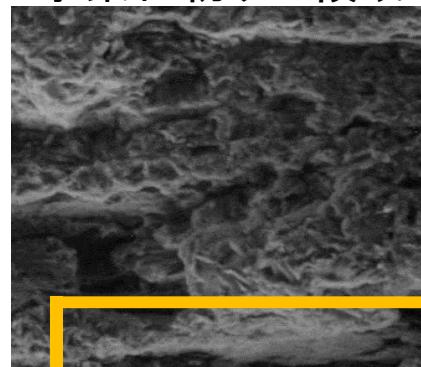
局所的にはボイドの発生・成長・連結の
集合として生じる延性的な損傷過程が支配

水素化物リム以外の殆どの領域
は デンプル で占められている



水素化物リム領域

その他の領域

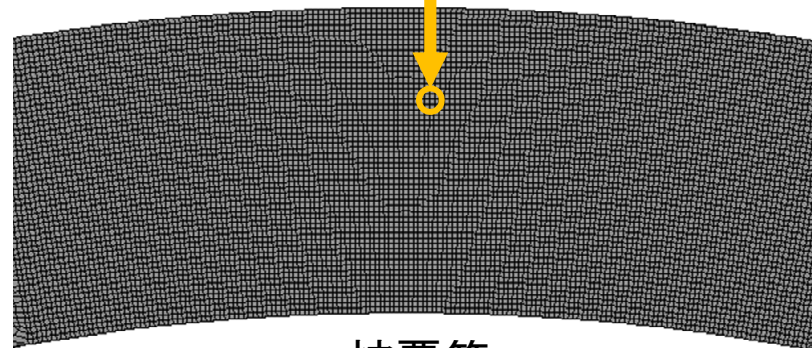


PCMI破損した被覆管の破面

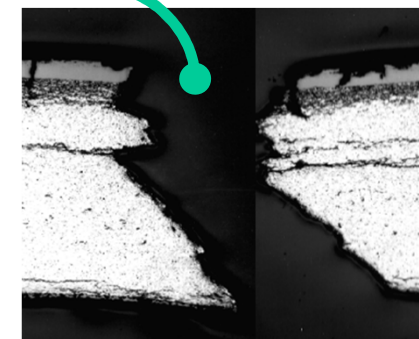
10μm

~10μm程度の
微小な領域

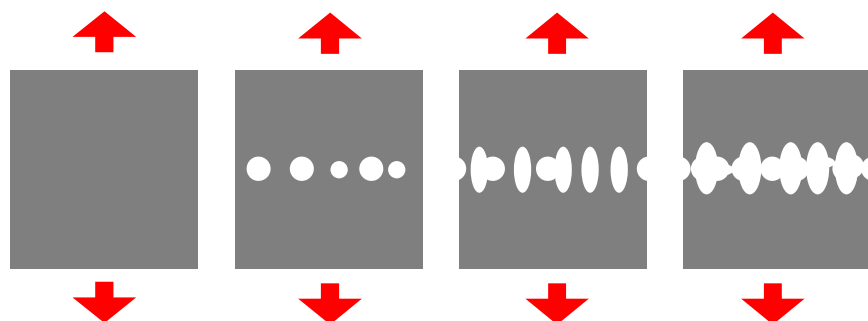
肉厚:
~600μm



被覆管



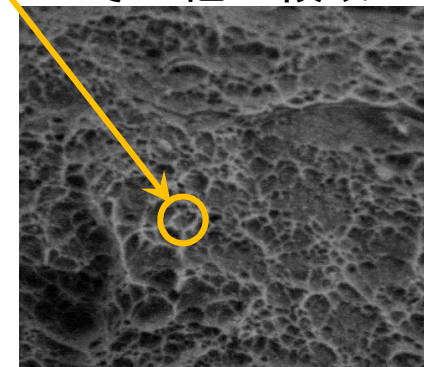
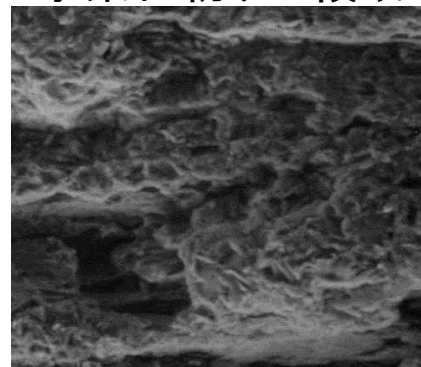
局所的にはボイドの発生・成長・連結の集合として生じる延性的な損傷過程が支配



水素化物リム以外の殆どの領域は デンプル で占められている

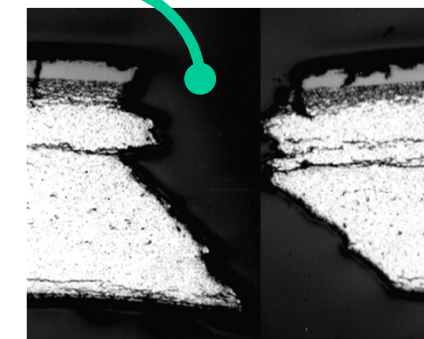
水素化物リム領域

その他の領域

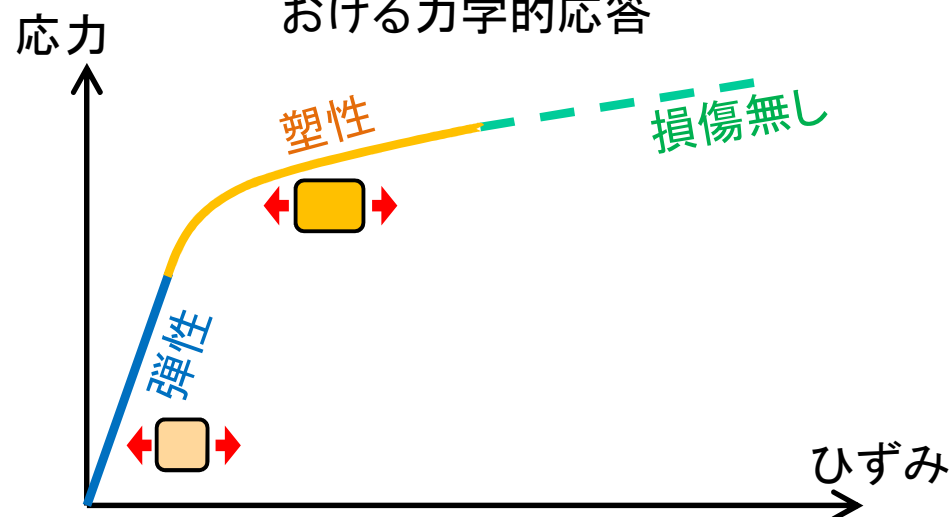


PCMI破損した被覆管の破面

10μm

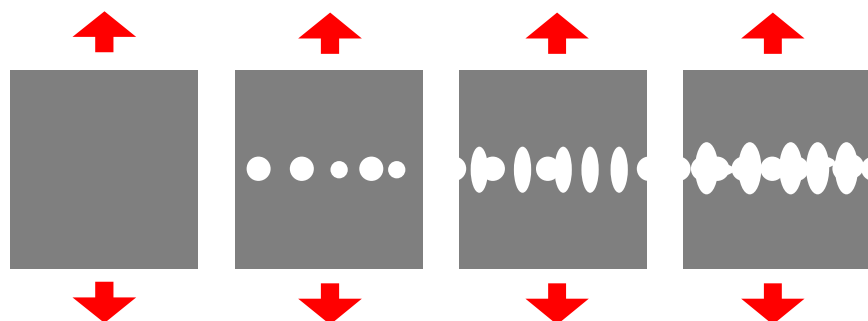


通常の有限要素解析における力学的応答



有限要素の力学的応答

局所的にはボイドの発生・成長・連結の
集合として生じる延性的な損傷過程が支配



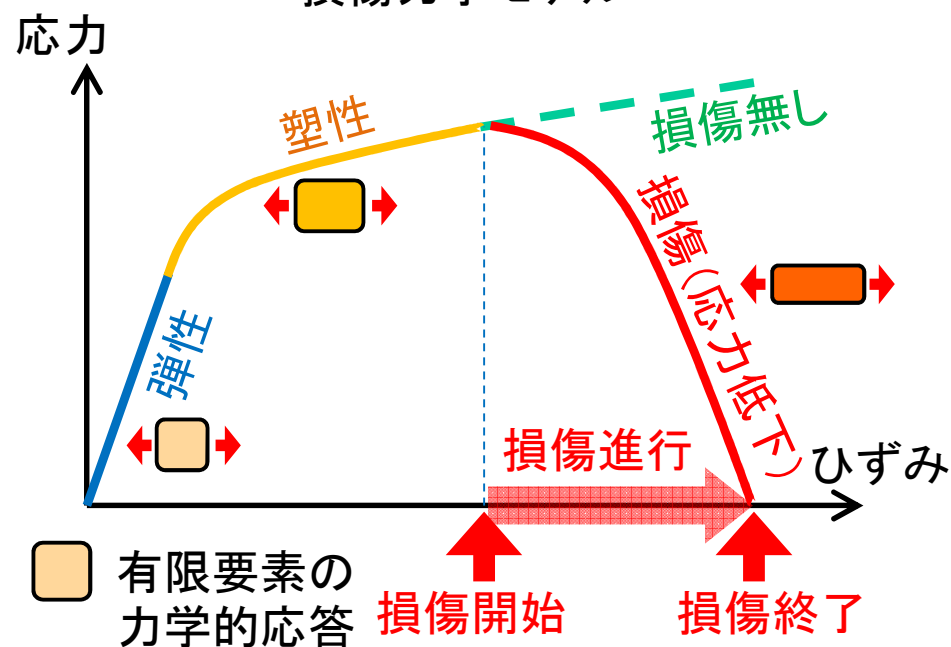
ある相当塑性ひずみ

ε_D で損傷開始

ある相当塑性変位

u_f で損傷終了

損傷力学モデル

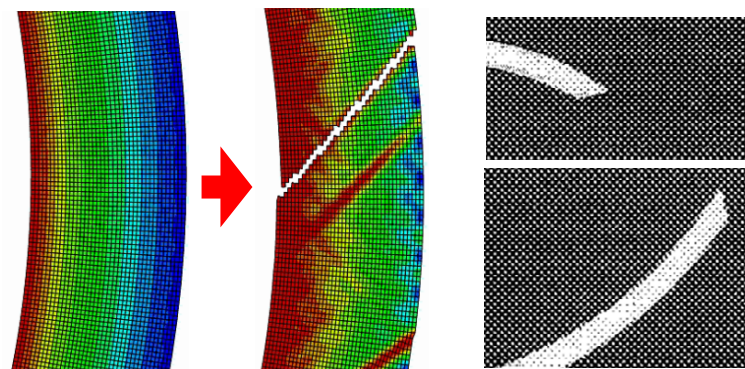


JAEAで実施した

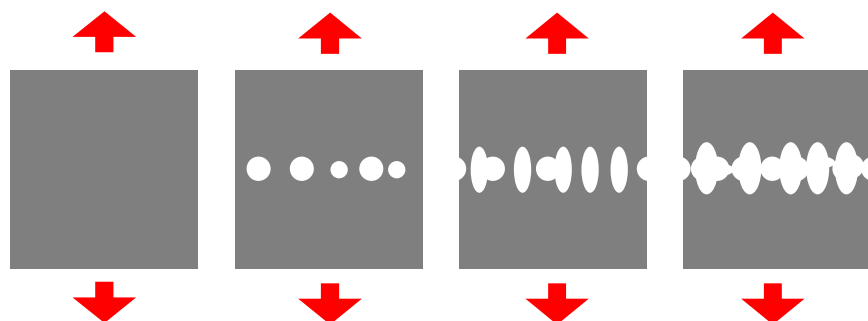
○バースト試験

○き裂入り被覆管のEDC試験

で得られた破損ひずみ量のデータを
用いて一意に決定



局所的にはボイドの発生・成長・連結の
集合として生じる延性的な損傷過程が支配



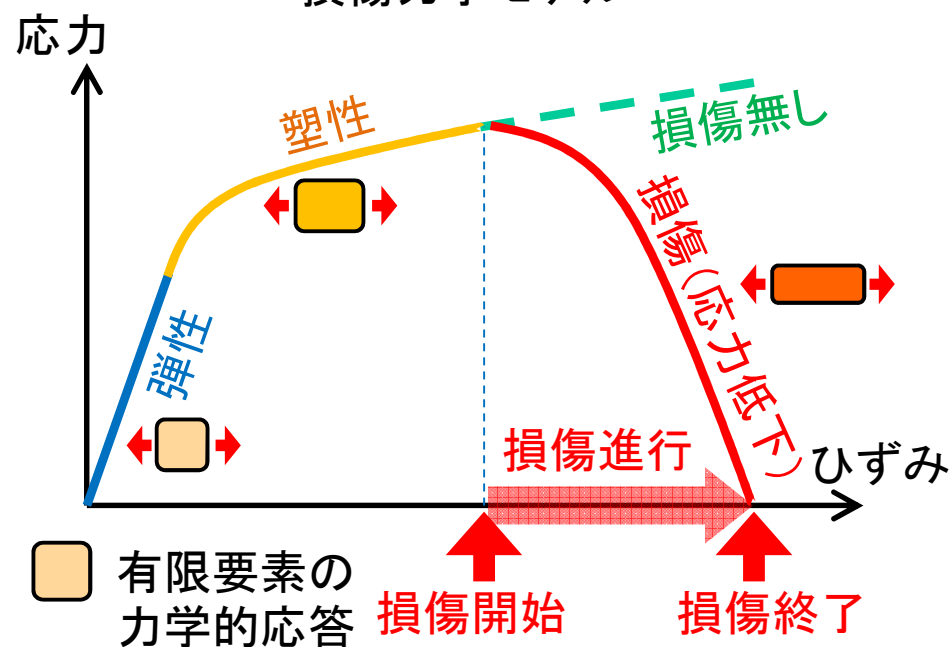
ある相当塑性ひずみ

ε_D で損傷開始

ある相当塑性変位

u_f で損傷終了

損傷力学モデル

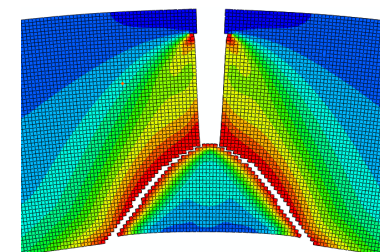
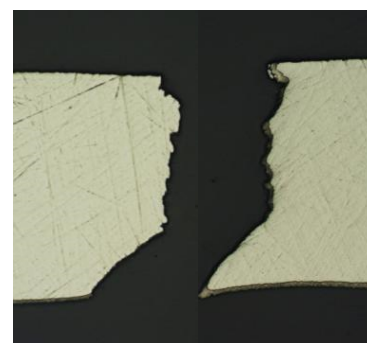


JAEAで実施した

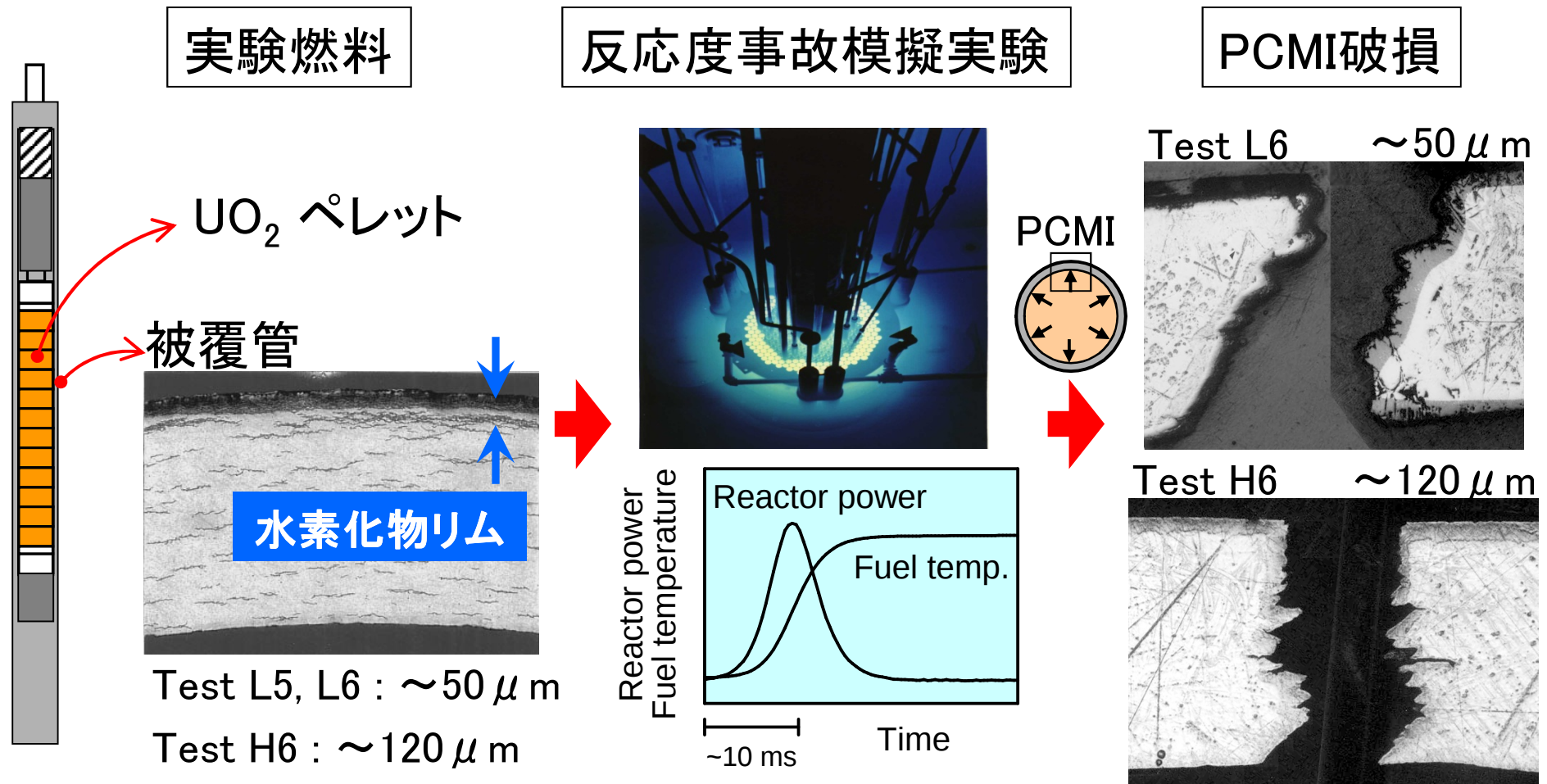
○バースト試験

○き裂入り被覆管のEDC試験

で得られた破損ひずみ量のデータを
用いて一意に決定

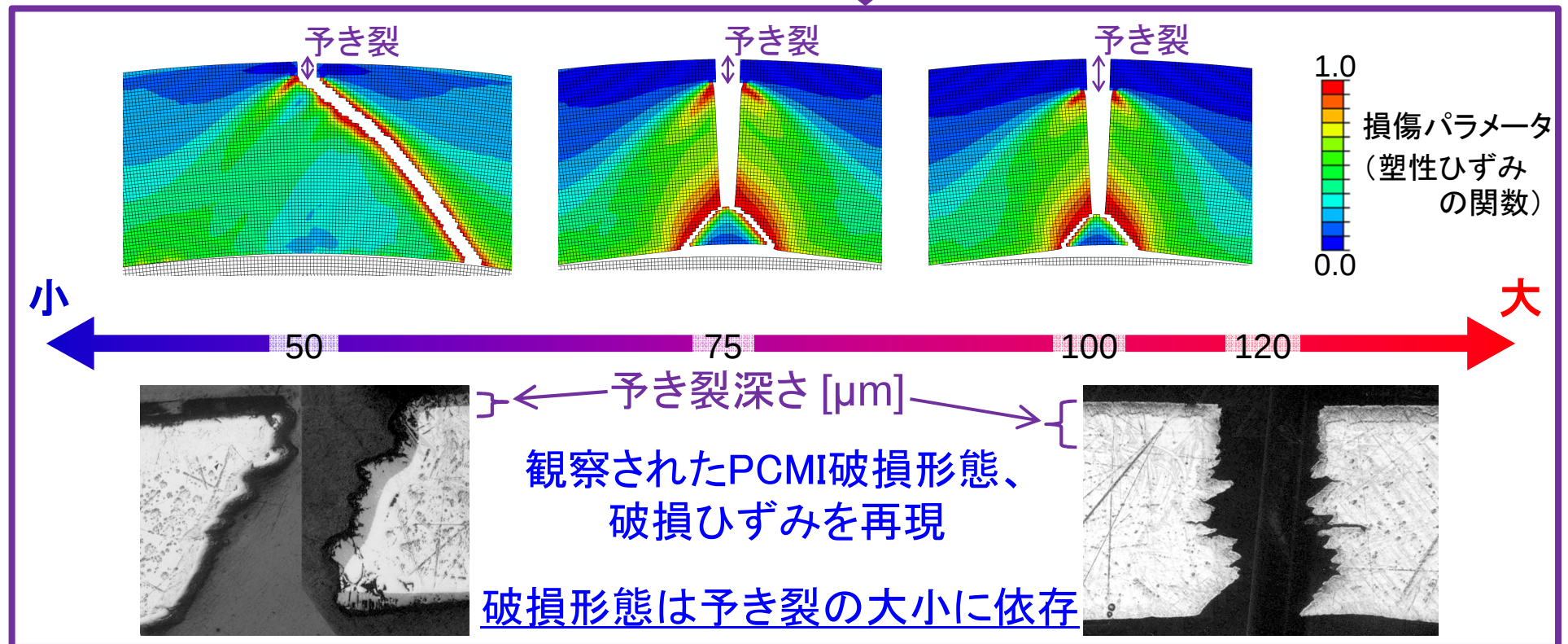
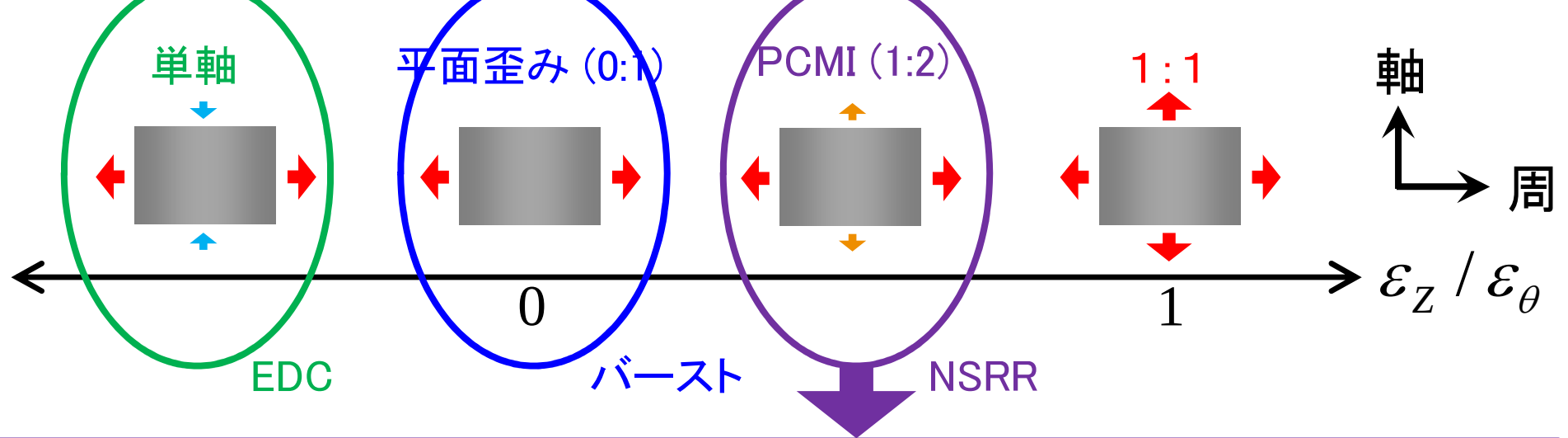


水素化物リム付き被覆管を用いたNSRR実験のシミュレーション

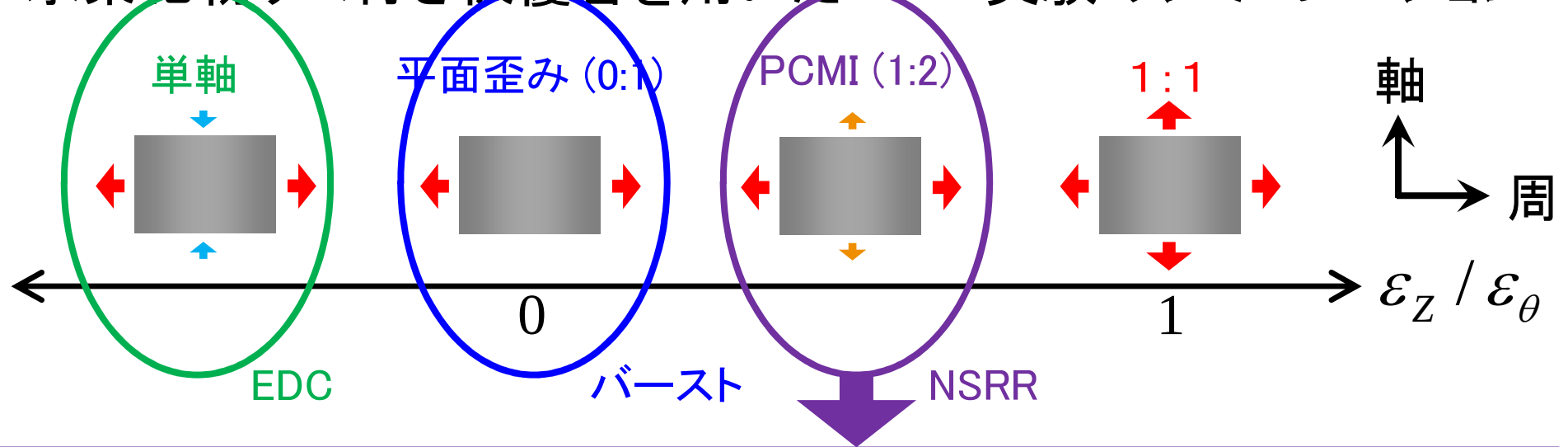


- ・ 外周部に水素化物リムを設けた未照射被覆管を試験燃料に使用
- ・ 水素化物リムの厚さ増に伴う破損限界の低下と破損形態の変化が見られた

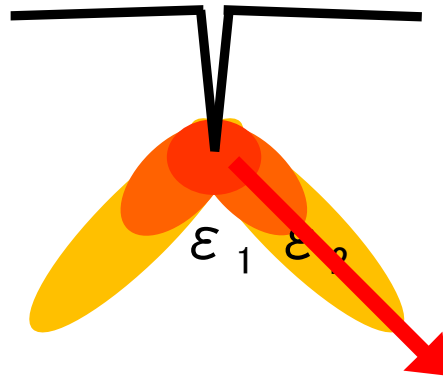
水素化物リム付き被覆管を用いたNSRR実験のシミュレーション



水素化物リム付き被覆管を用いたNSRR実験のシミュレーション

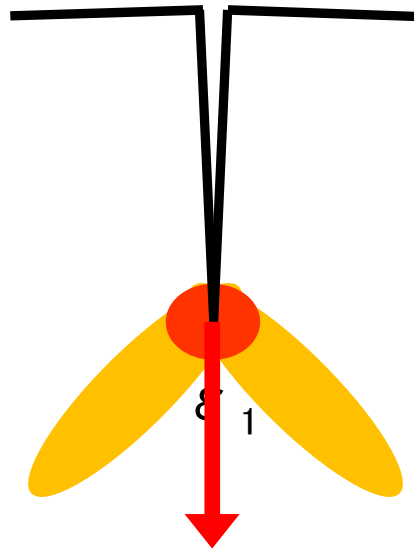


浅いき裂



き裂が浅くなる程、斜め方向のひずみ ε_2 は大きく (ε_1 に近くなる)

深いき裂



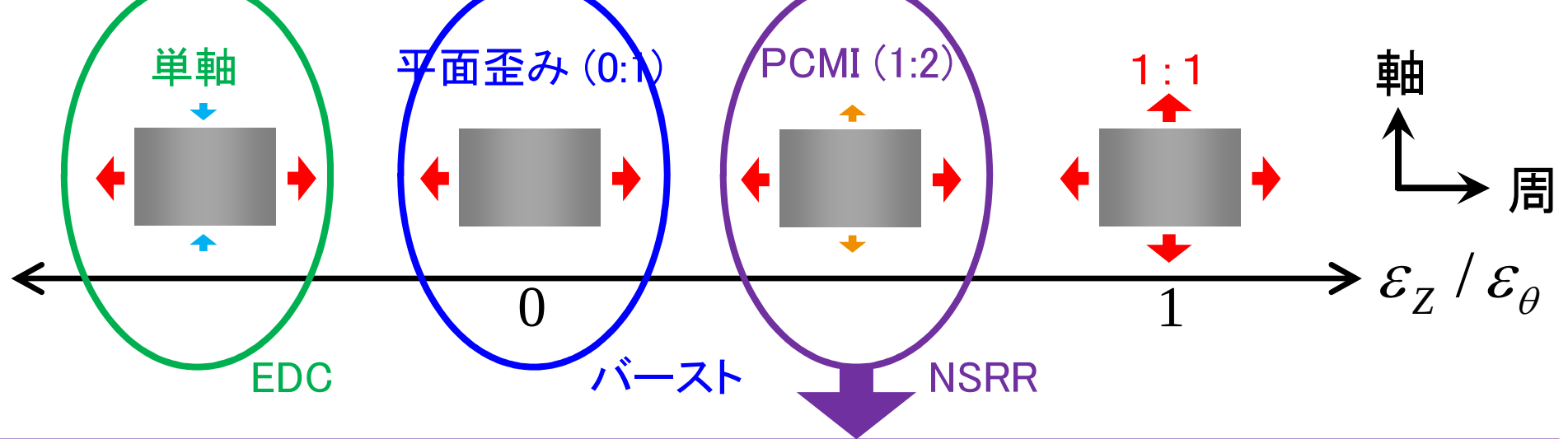
←き裂先端が同じひずみ ε_1 に達した状態の比較

き裂先端ではひずみが最大となるのは常に垂直(↓)方向

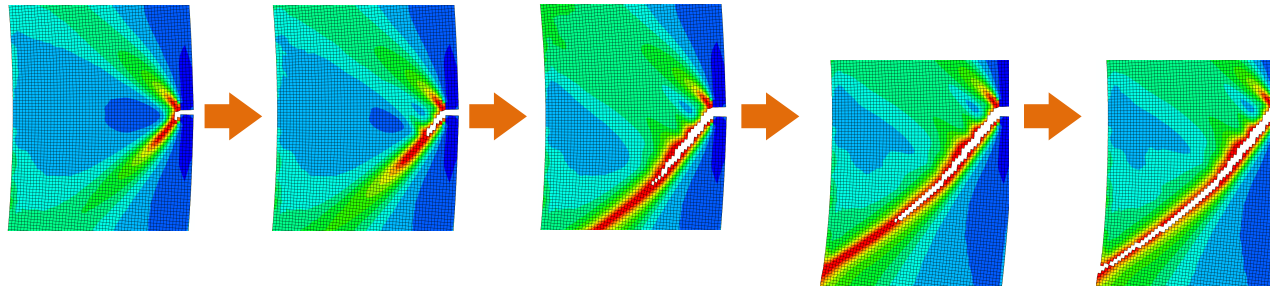
ε_2 が大きくなってくると、斜め方向の大変形(せん断)が発生した方が、(垂直方向のき裂開口よりも)体系が安定化するケースが出てくる

き裂進展方向が変化→ 破損形態は予き裂の大小に依存

水素化物リム付き被覆管を用いたNSRR実験のシミュレーション



内面ひずみ2.23%



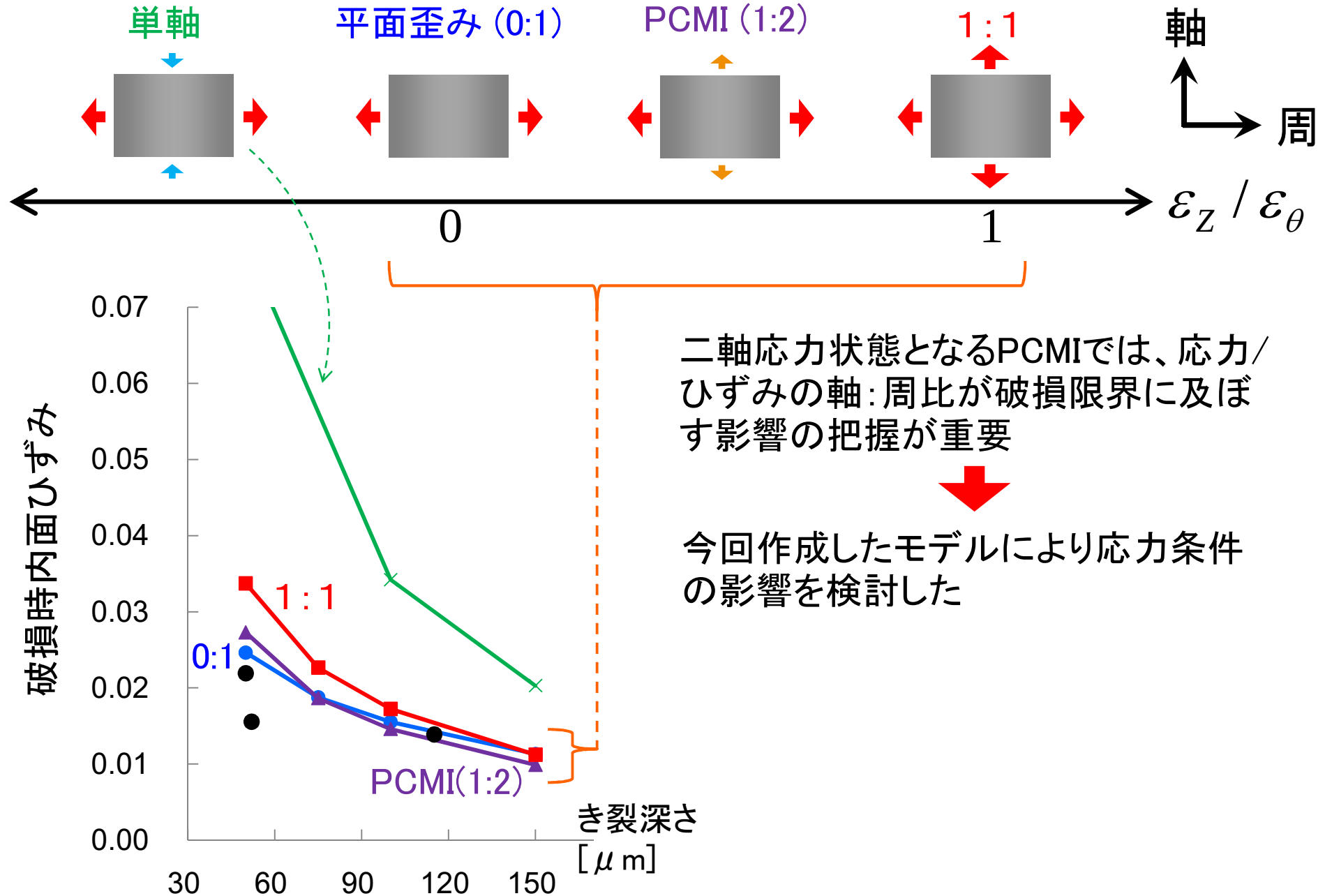
内面ひずみ2.25%

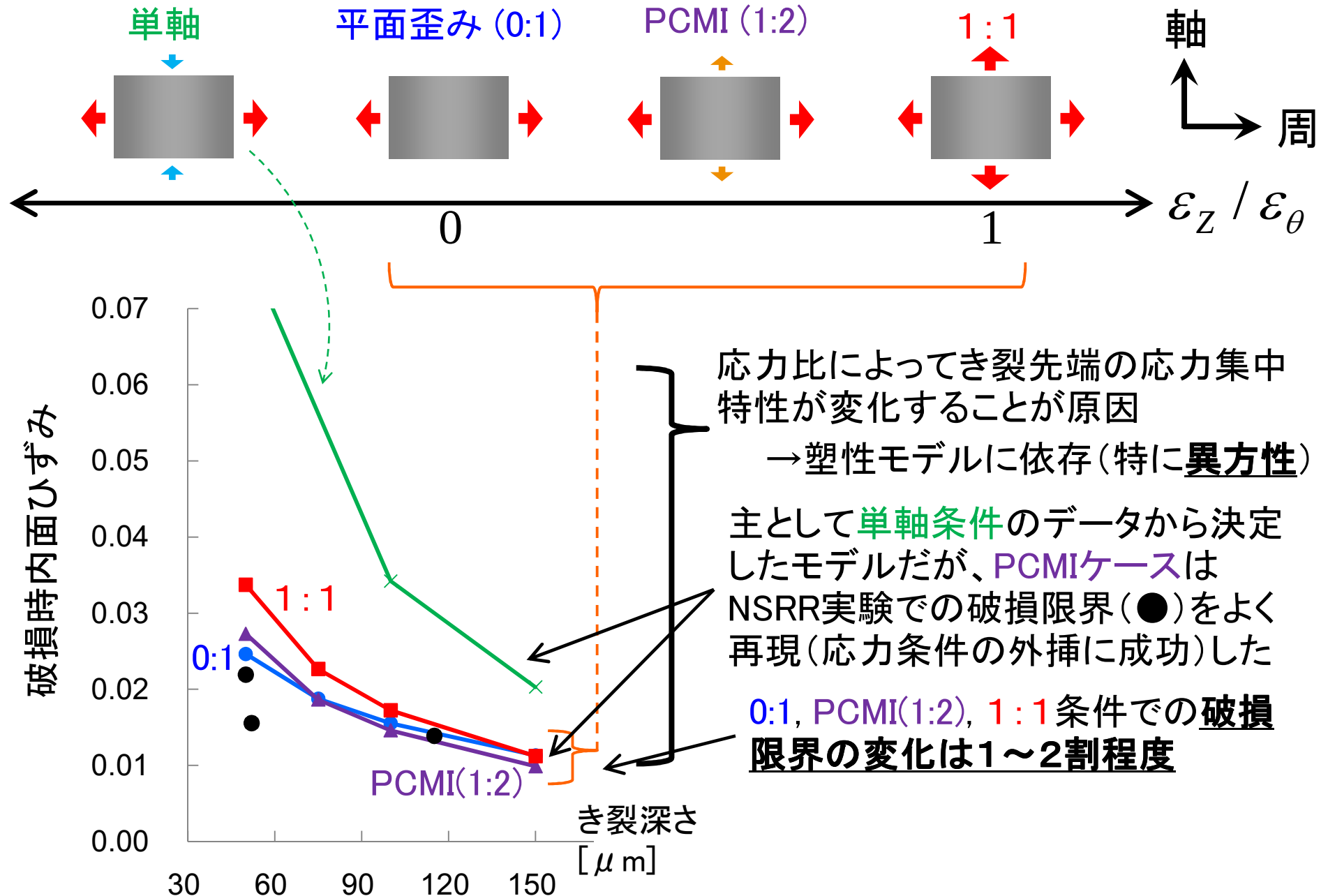
き裂進展開始から貫通までのひずみ増分は非常に小さい: **「進展開始≒破損」**

→ 金属層中で停止したき裂が観察されない実験事実符合



巨視的な破損限界はき裂先端の挙動(き裂進展開始の条件)で決定している





- 機械特性試験データに基づいて損傷特性を定義し
- 外面予き裂を設けた
 - 被覆管の数値モデルにPCMI負荷を与えた結果、NSRR実験で破損した被覆管の観察結果に一致する破損限界及び破損形態が得られた



従来静的観察からの類推であった動的破損プロセスの理解が裏付けられ、破損挙動の詳細説明が進んだ

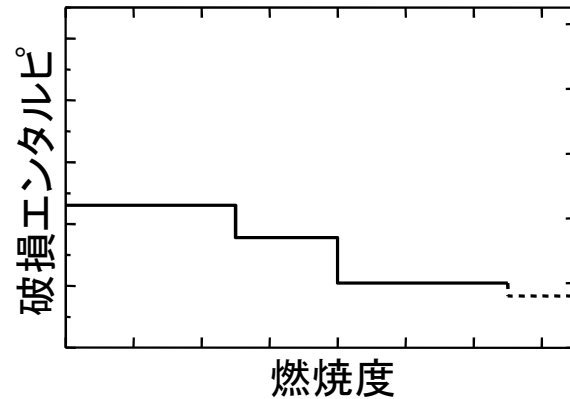
PCMI特有の負荷条件が破損に及ぼす影響について推定が可能



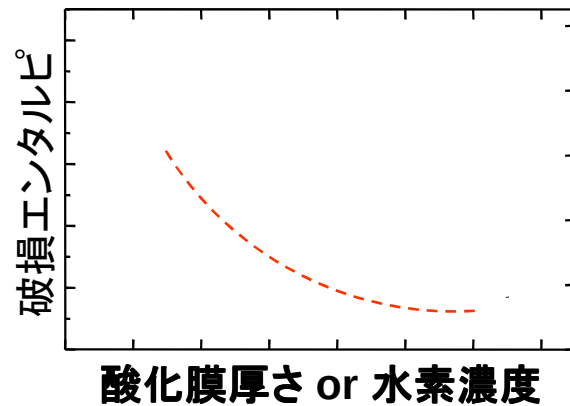
- | | | |
|---|------|--|
| { | 二軸応力 | 平面ひずみから二軸引張条件間での破損限界の変化は特に被覆管塑性挙動の異方性に依存し、その変化の程度は1～2割程度 |
| { | 温度勾配 | き裂先端付近の温度変化は破損限界に大きく影響する一方、被覆管内面側温度の上昇の影響は非常に小さい |

④破損メカニズム解明

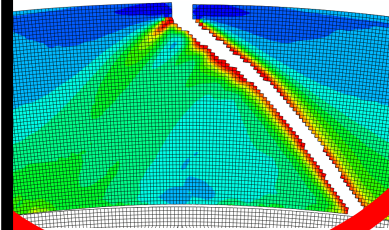
現行のPCMI破損の判断基準



検討を進めている新しい基準

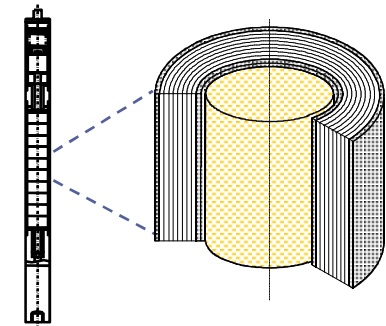


形・破損の詳細解析



詳細解析の裏付け
を得たより簡易的
な破損評価モデル

燃料挙動解析コード
FEMAXI/RANNSの開発



⑤様々な条件下で破損の有無を適切に
評価できる手法の確立

安全審査基準への反映