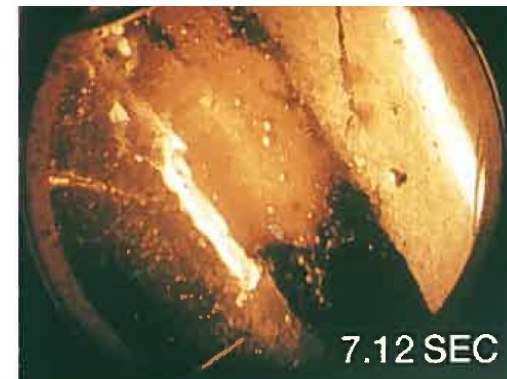
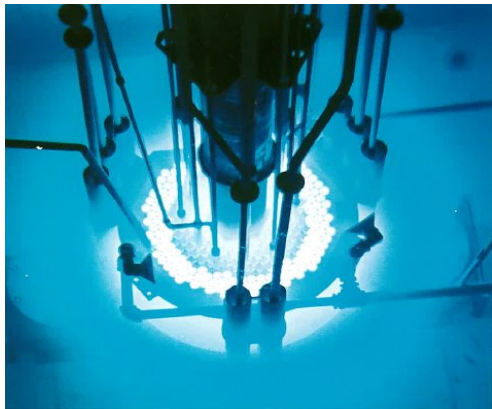


2015年10月15日

# 軽水炉事故時の燃料のふるまい

— 反応度事故を中心に安全評価指針 —



齋藤伸三

## 内容:

- 燃料のふるまいから見た事故の分類
- NSRR実験の概要
- 投入反応度(燃料エンタルピー)量による燃料ふるまいの相違
- 過渡時の燃料の様子 of 可視化
- 安全評価指針

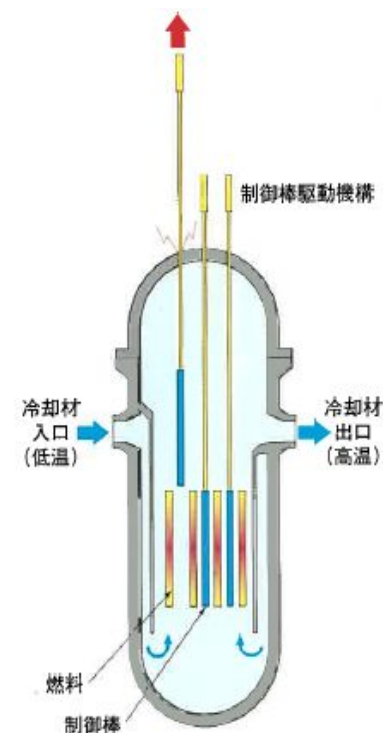
# 燃料のふるまいから見た事故の分類

燃料のふるまいに著しい影響を及ぼす軽水炉の事故としては、**冷却材喪失事故**と**反応度事故**がある。

**冷却材喪失事故**は、極端な事例としてはTMI事故や東電福島事故に代表されるものである。

**反応度事故**は、出力が制御できない状態になって原子炉出力が急上昇(暴走)する事故であり、原子炉燃料は過熱されて破損に至る可能性がある。この事故の原因としては、例えば、制御棒が何らかの原因で原子炉から飛び出す、あるいは落下することが考えられる。

**チェルノブイリ原子力発電所事故**は、これまでに生じた最大の**反応度事故**である。この事故は、炉心頂部よりさらに上部に待機させていた制御棒を急速に挿入する過程で、炉心からの中性子の漏れを押し戻す結果を招いたことによる。



PWRの例

# NSRR 計画

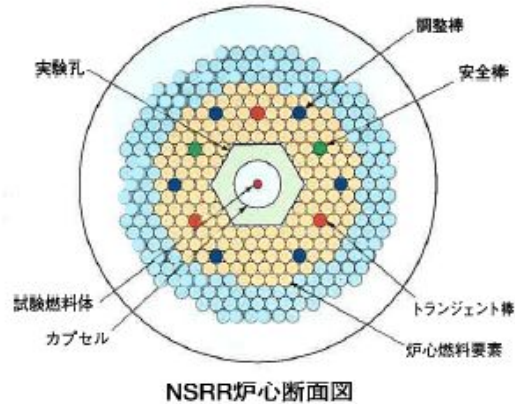
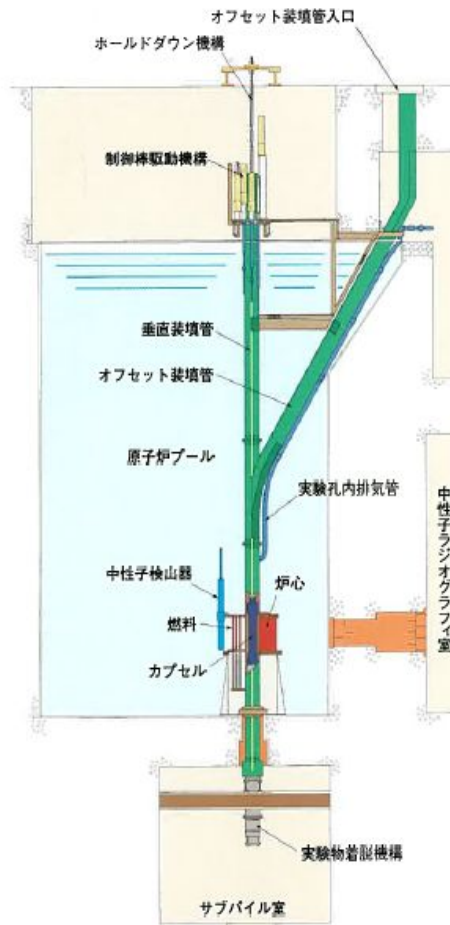
NSRR計画は、軽水炉における反応度事故時の燃料のふるまいを実験的に研究するために原子炉安全性研究炉(NSRR)を使用した実験計画として、1975年に開始した。第I期計画では未照射燃料を対象とし、燃料及び冷却条件をパラメータにし数多くの実験を実施した。1989年からは燃焼の進んだ照射済燃料を主な対象とする第II期計画を進めるとともに、更に高燃焼度燃料、MOX燃料をも対象に進めている。これらの結果は、安全評価指針の策定に役立てられている。



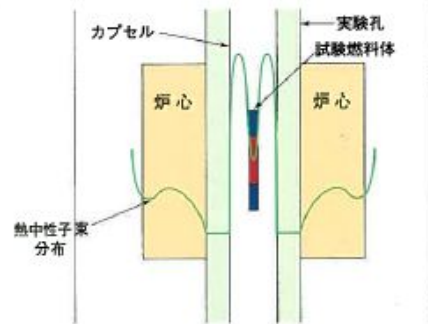


# NSRRの概要

NSRRは、燃料の安全性研究専用炉として、1975年以来使用されている。  
 原子炉は米国GA社のTRIGA-ACPR(Annular Core Pulse Reactor)を基本としている。  
 1989年には運転能力向上のための改良を行った。



NSRR炉心断面図



NSRR熱中性子束分布図

炉心	有効高さ 約38cm	燃料棒 濃縮ウラン-水素化 ジルコニウム 丸棒 (約3.75cmφ X約65cmL) 濃縮度 20% 燃料要素数 157本 被覆材 SUS304
	等価直径 約63cm	
	減速材 水素化ジルコニウム 及び軽水	
	反射材 黒鉛及び軽水	

NSRRの主な設計仕様

# NSRRの運転性能

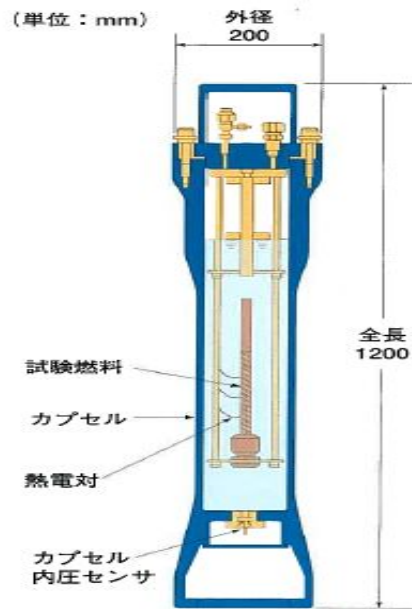
オリジナル

運転の種類及び運転モード		原子炉出力特性の代表例	
定出力運転	定出力運転	<p>炉出力 300KW 時間 (min)</p>	臨界点の確認と計器の校正
	単一パルス運転	<p>炉出力 23,000MW 積分出力 130MW·s 時間 (ms)</p>	零出力からの反応度事故
パルス運転	台形パルス運転	<p>炉出力 10MW 積分出力 110MW·s 時間 (s)</p>	異常な過渡出力
		<p>積分出力 10MW 炉出力 110MW·s 時間 (s)</p>	異常な過渡出力上昇
	合成パルス運転	<p>炉出力 10MW 23,000MW 積分出力 110MW·s 時間 (s)</p>	出力運転状態からの反応度事故
		<p>炉出力 23,000MW 10MW 積分出力 110MW·s 時間 (s)</p>	反応度事故に続く高出力

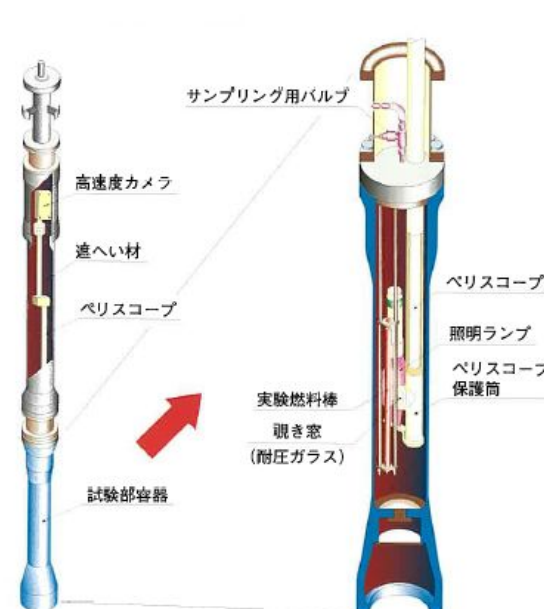
改良

# 未照射燃料実験用設備

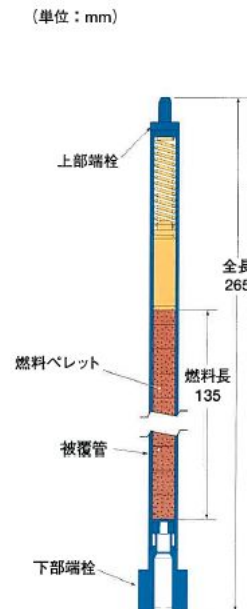
未照射燃料実験用設備としては、実験目的に応じて様々な設備が開発された。それらは、**大気圧カプセル**、**高温高压カプセル**、**高温高压水ループ**、更にカプセル内部の試験燃料のふるまいを高速度カメラで撮影できる、世界初の**可視カプセル**等である。いずれの設備も燃料破損に伴う核分裂生成物である放射性物質を閉じ込め、また、発生の可能性のある圧力波を閉じ込める構造である。なお、**照射済燃料実験用**は基本的には**二重カプセル構造**としている。



未照射燃料実験用大気圧水カプセル概略図



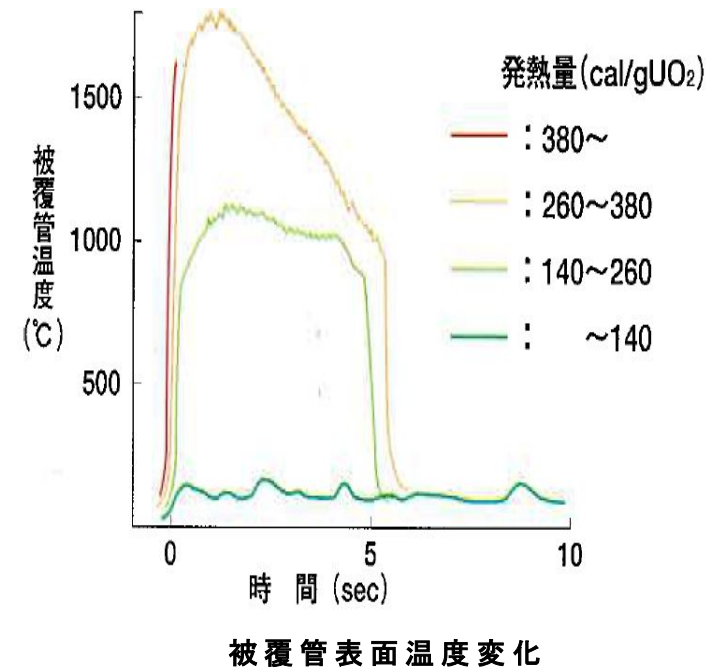
可視カプセル実験装置概略図



代表的な試験燃料

# 投入反応度(燃料エンタルピー)量による燃料ふるまいの相違

出力暴走により燃料1gあたりに発生したエネルギーをパラメータとして、反応度事故時の燃料の基本的なふるまいを被覆管の温度挙動と実験後の外観写真で示す。  
(未照射燃料、大気圧実験による。)





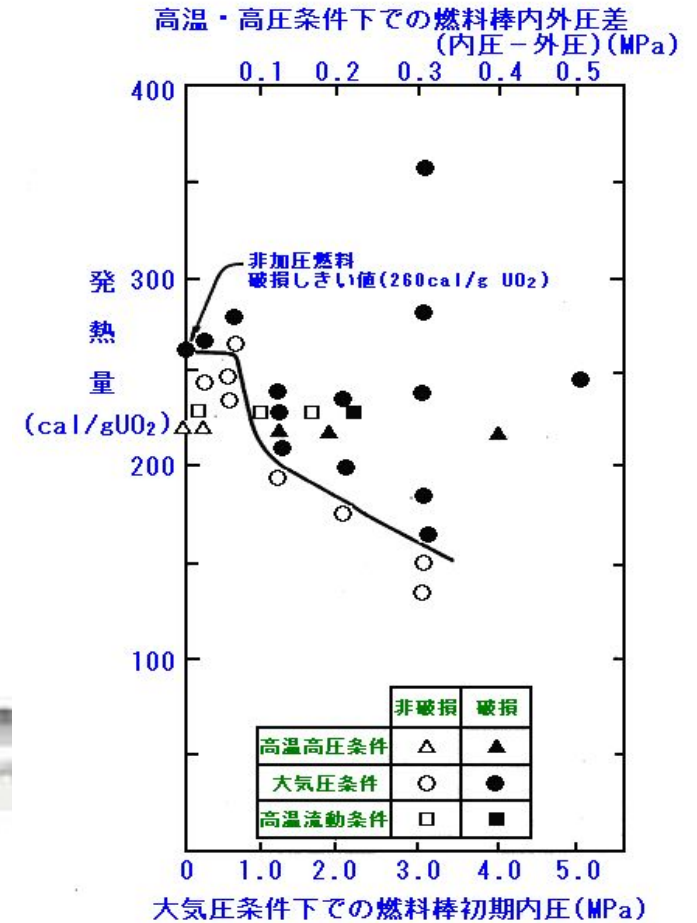
# 予加圧燃料のふるまい



破損部拡大



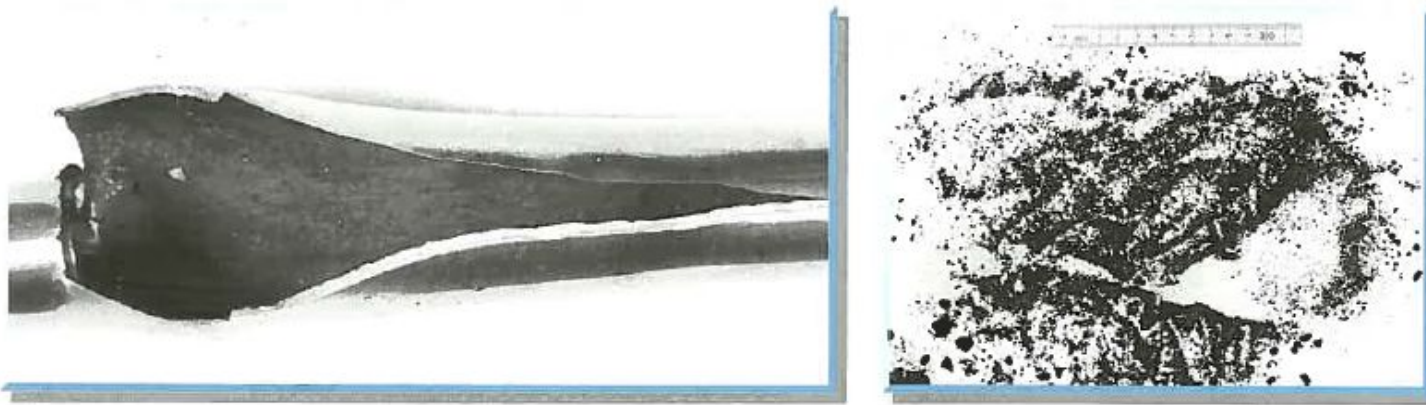
実験後の試験燃料の外観



予加圧燃料の破損しきい値

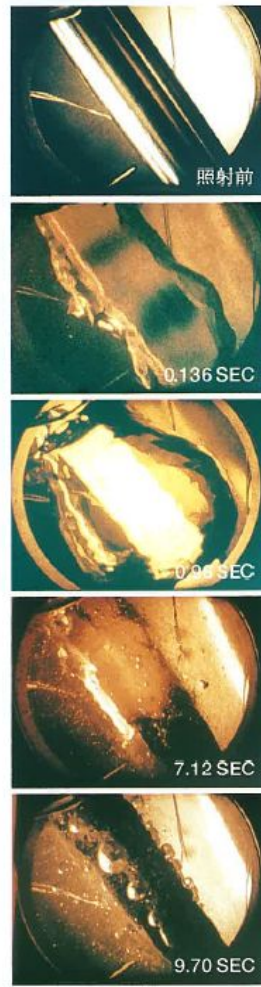
# 欠陥のある燃料（浸水燃料）のふるまい

万一、欠陥のある燃料（被覆管に貫通孔があり、水が浸入）が存在した場合を考慮した浸水燃料実験も実施された。

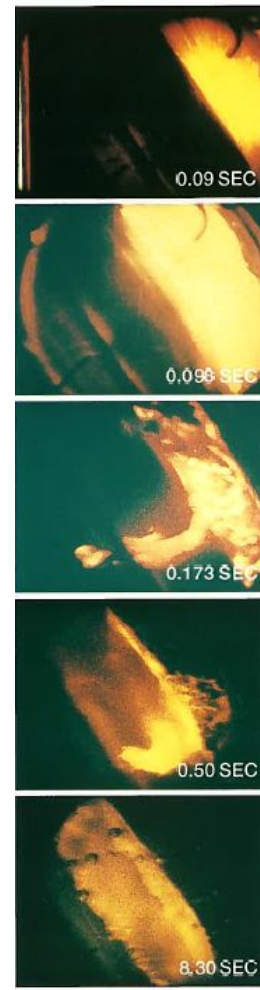


比較的小さな出力暴走で燃料は破損し、ペレットは粉々になって飛散し圧力波の発生も確認された。破損のしきい値は約 $90\text{cal/g}\cdot\text{UO}_2$ である。

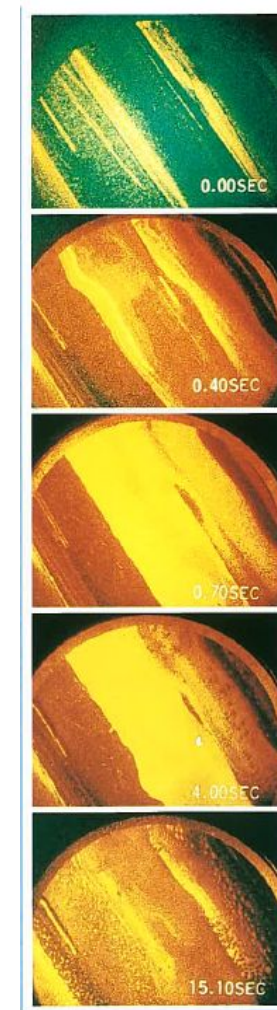
# 燃料の過渡時ふるまいの可視化



被覆管の脆化破損

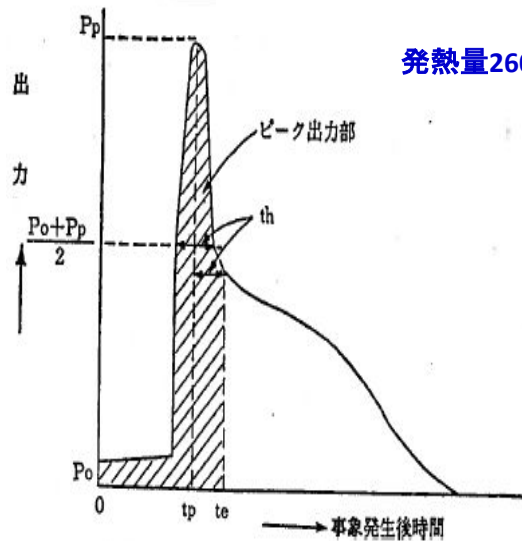


被覆管の内圧破損

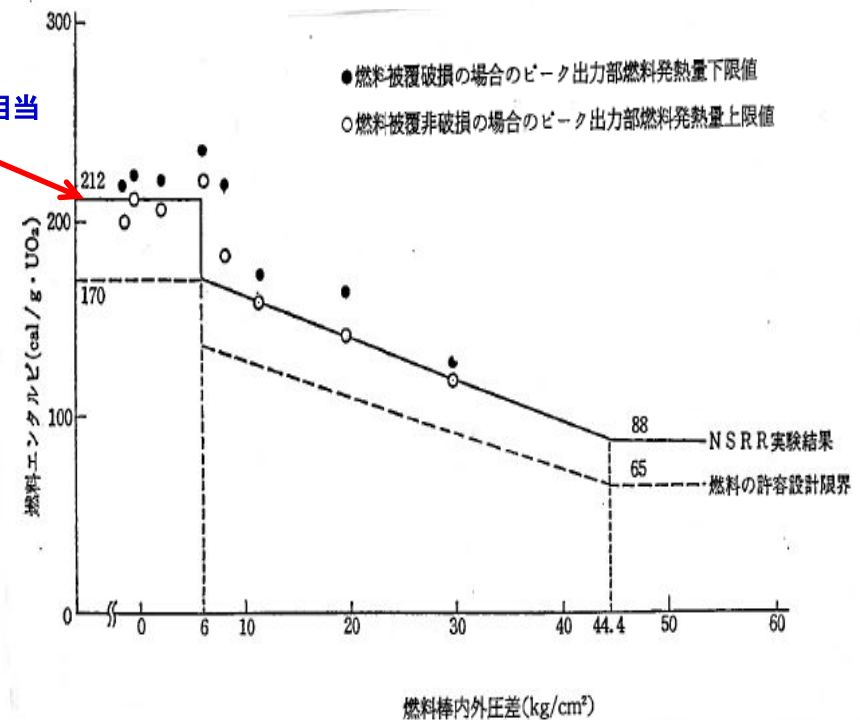


被覆管の熔融破損

# NSRR実験における発熱量と発電炉の燃料エンタルピーの関係



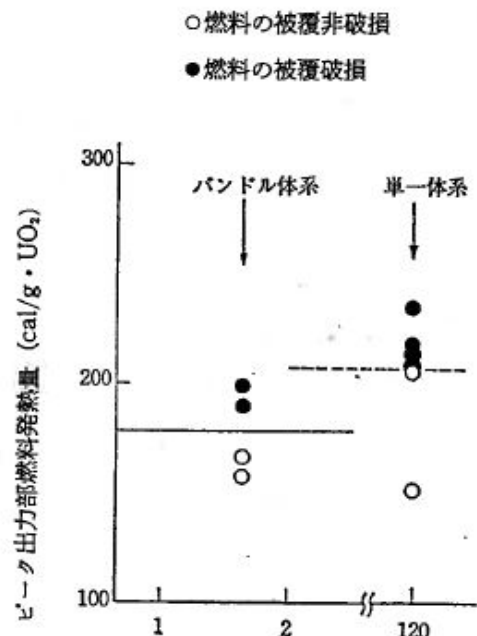
反応度投入事象におけるピーク出力部の定義



燃料内外圧差に対する燃料被覆破損限界

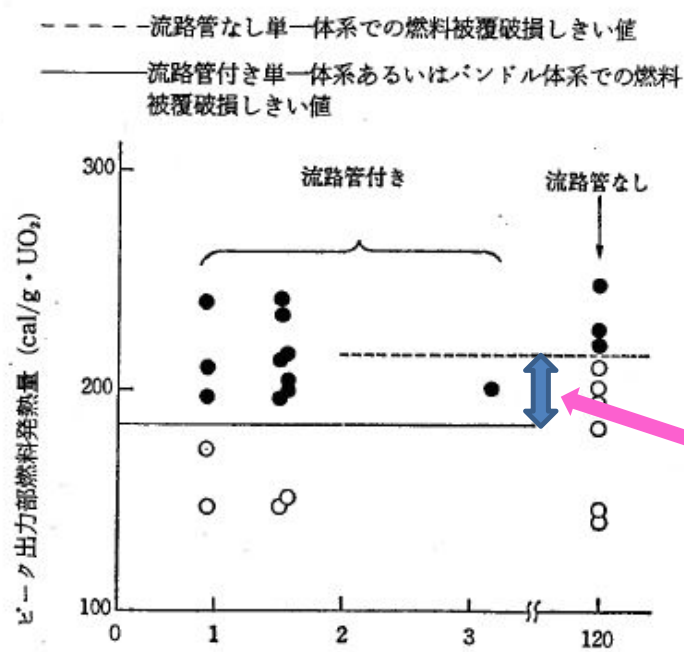


# 流路断面積の燃料破損しきい値の及ぼす影響



冷却水有効断面積/燃料断面積

(a) 20%濃縮燃料に対するバンドル体系及び単一体系(流路管なし)での実験結果の比較



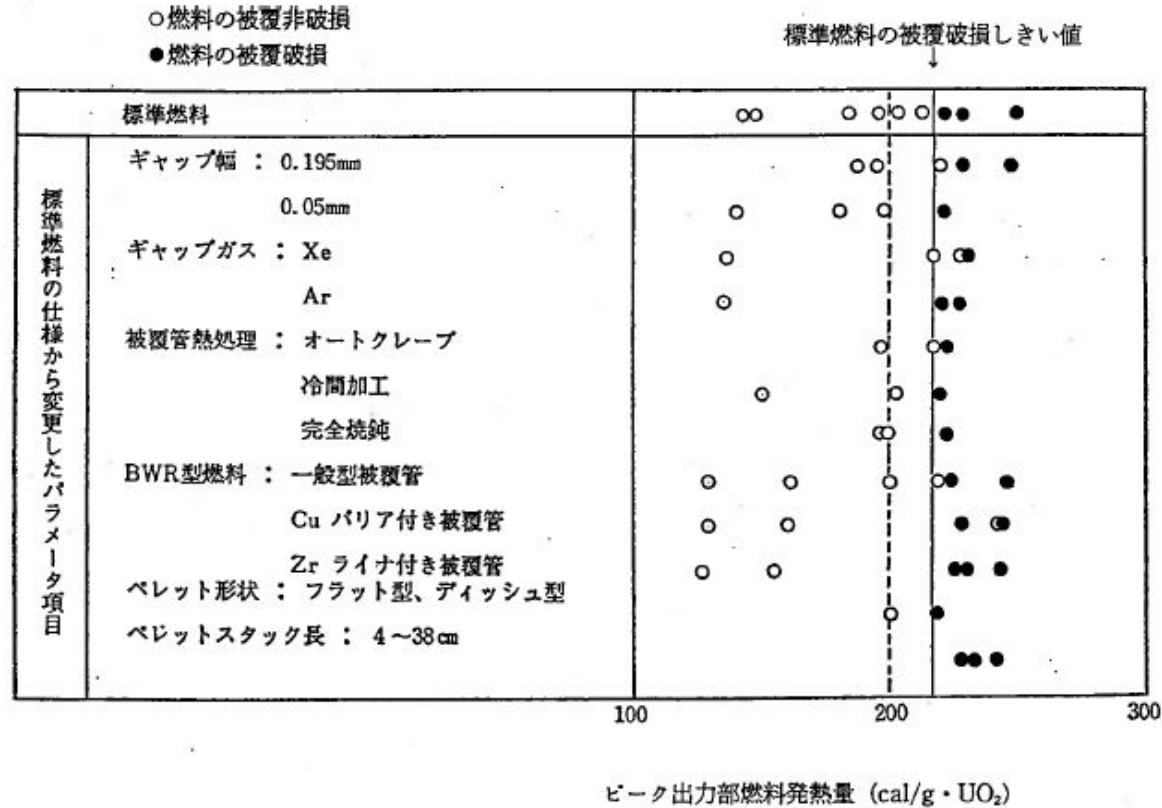
冷却水有効断面積/燃料断面積

(b) 10%濃縮燃料に対する単一体系での流路管付き及び流路管なしの条件での実験結果の比較

破損しきい値は約15%低下

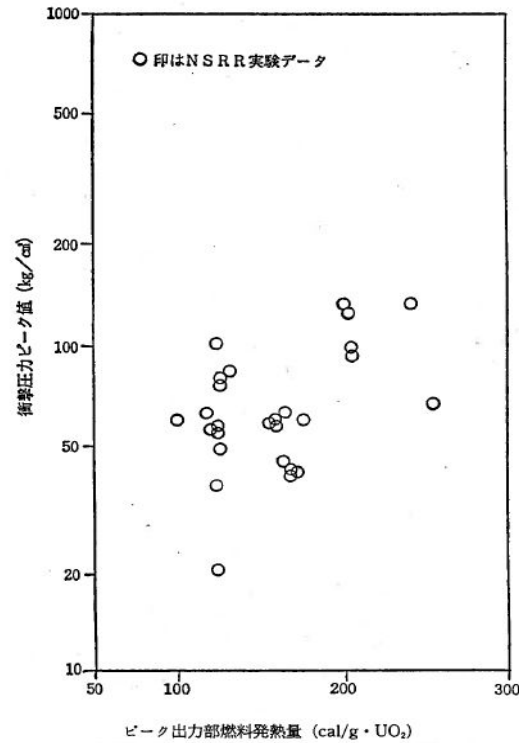
## 流路断面積の燃料破損しきい値の及ぼす影響

# 各種パラメータの燃料破損しきい値に及ぼす影響

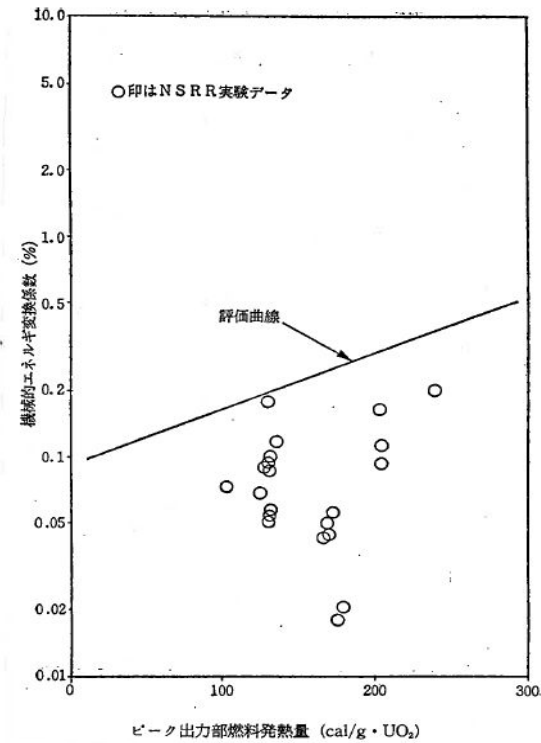


各種パラメータの燃料破損しきい値に及ぼす影響

# 浸水燃料破裂による衝撃圧力と評価曲線



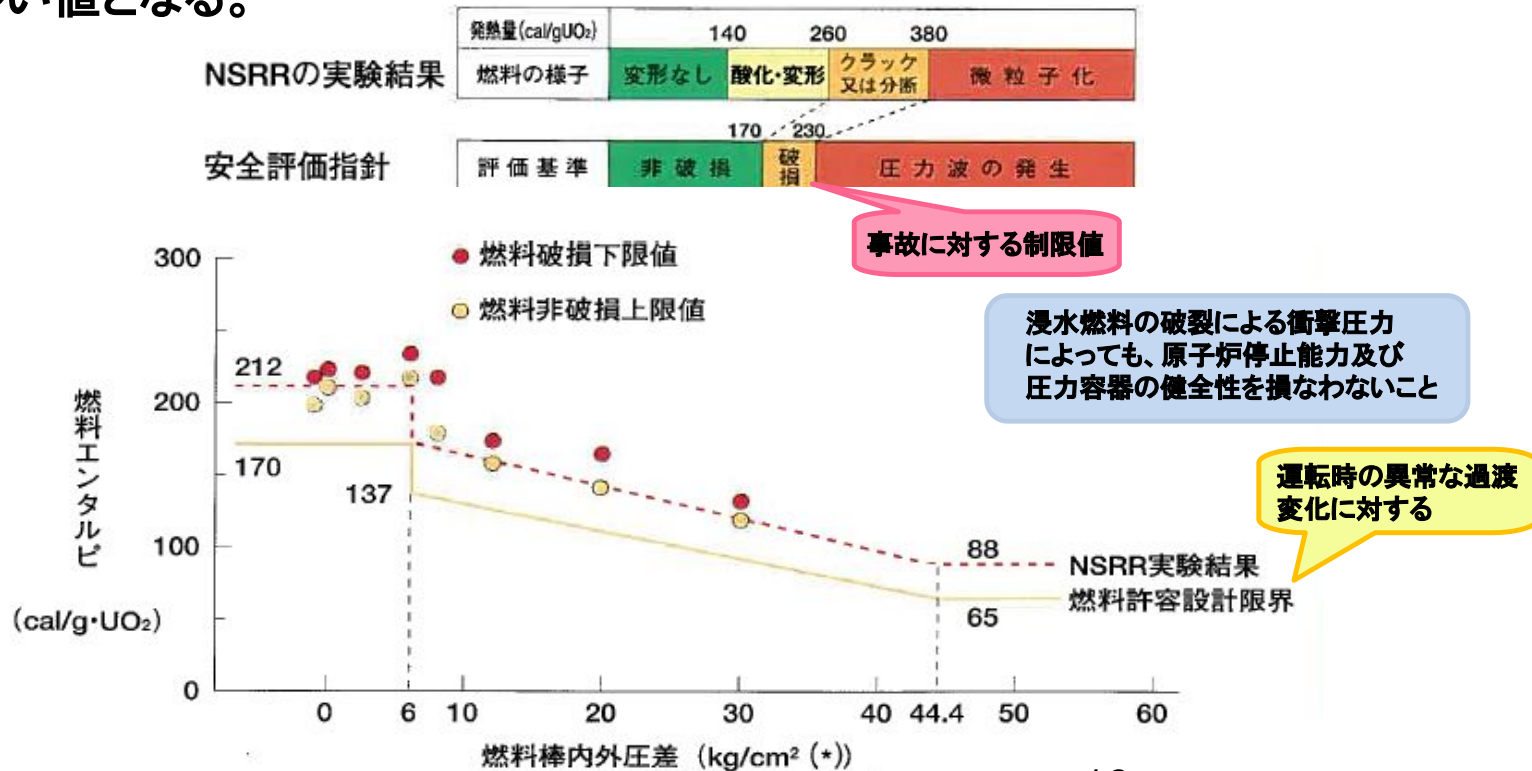
浸水燃料破裂時の衝撃圧力ピーク値



衝撃圧力による機械的エネルギー変換係数及び評価曲線

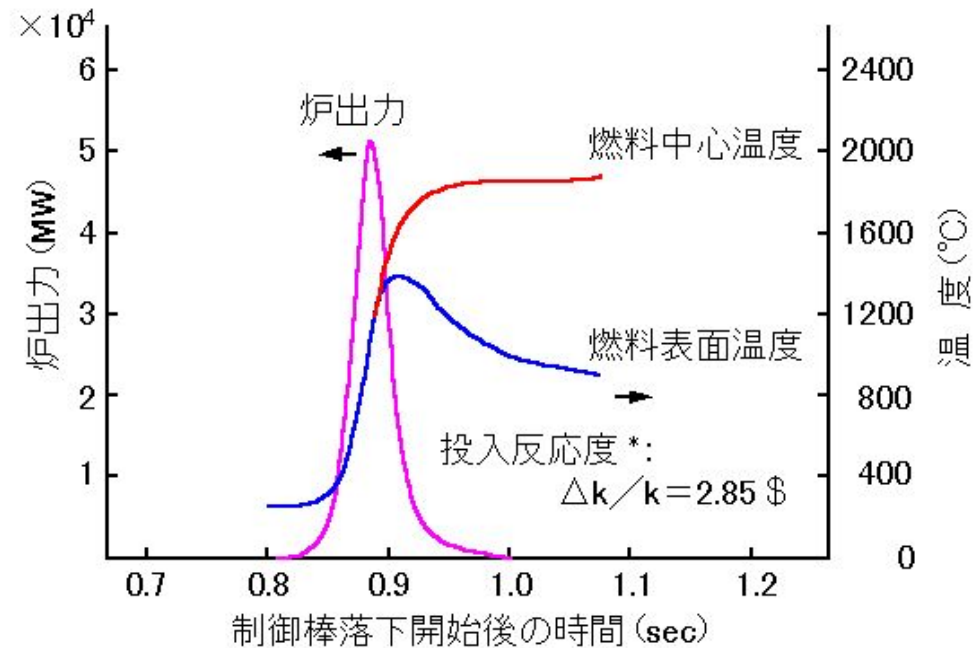
# 反応度投入事象に関する評価指針

NSRR第I期計画の成果を元に安全評価指針が策定された。(1984年) その際、軽水炉との体系の違いなどを考慮した上、十分な安全率を見込んでいる。また、NSRR実験では発熱量で実験結果を整理しているが、安全評価指針では「燃料エンタルピー」を基準としている。これは除熱の効果等を考慮した値であり、発熱量より小さい値となる。





# 発電炉における過渡挙動解析例



\*: BWR8×8型110万kWで、初期出力/定格出力 $=10^{-6}$ のとき制御棒が落下すると、この反応度が投入される。

反応度投入による出力、燃料棒温度の過渡変化解析例(BWR制御棒落下事故)

# 照射による燃料の影響（１）

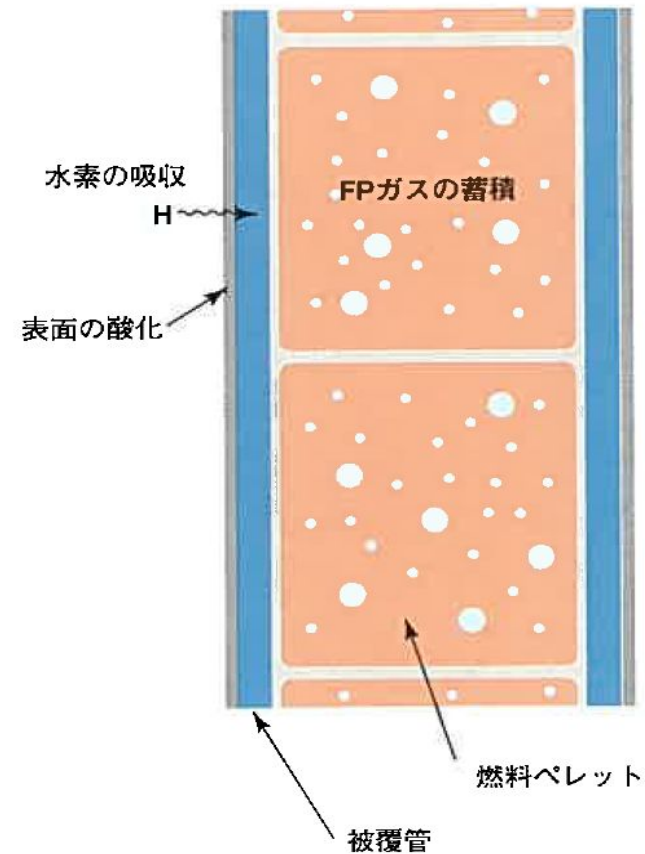
燃料の燃焼度の増加



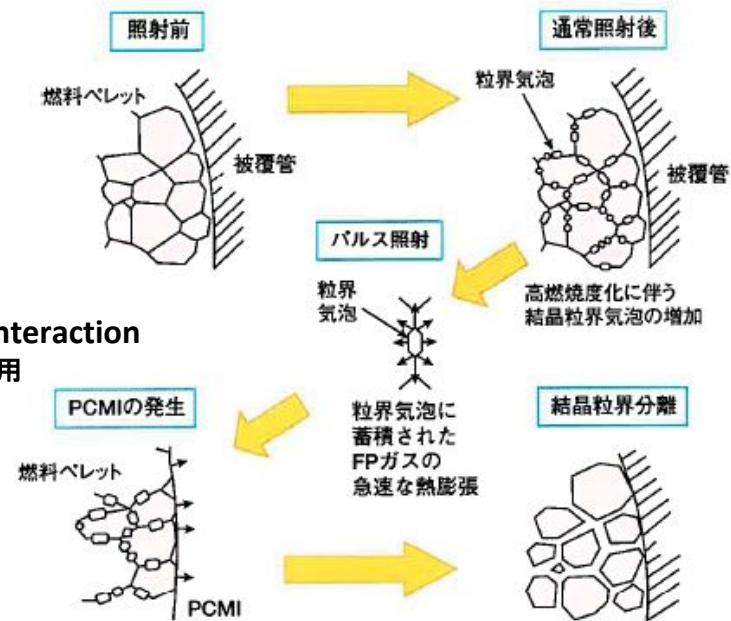
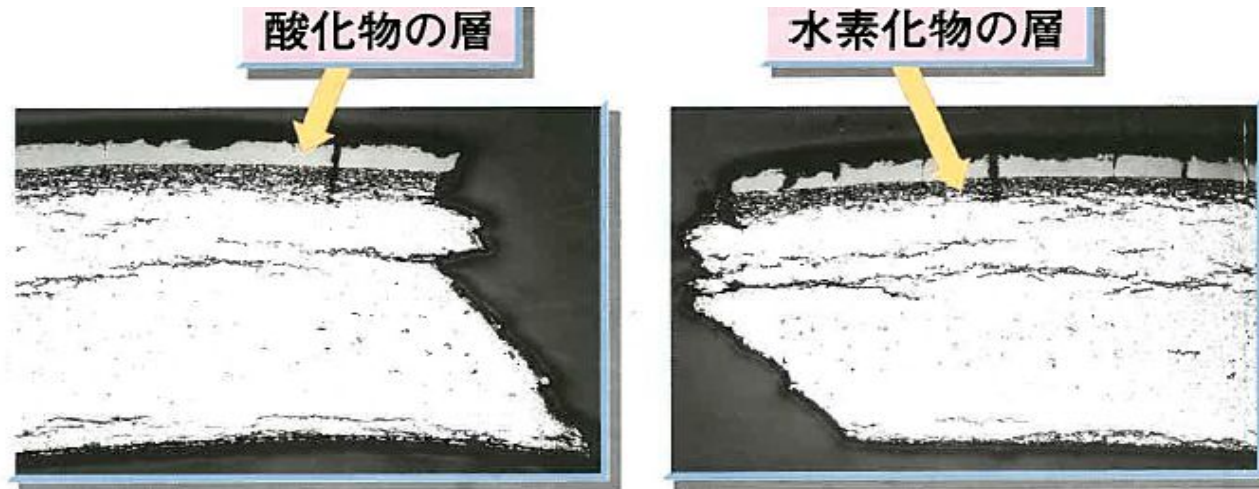
- 被覆管の酸化及び水素吸収の増加
- ガス状核分裂生成物の蓄積



燃料破損しきい値  
低下の可能性

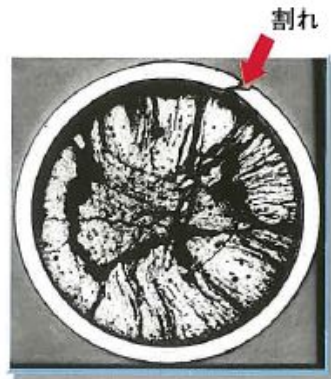
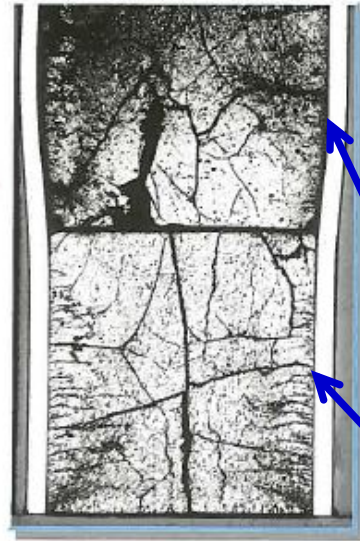


# 照射による燃料の影響 (2)

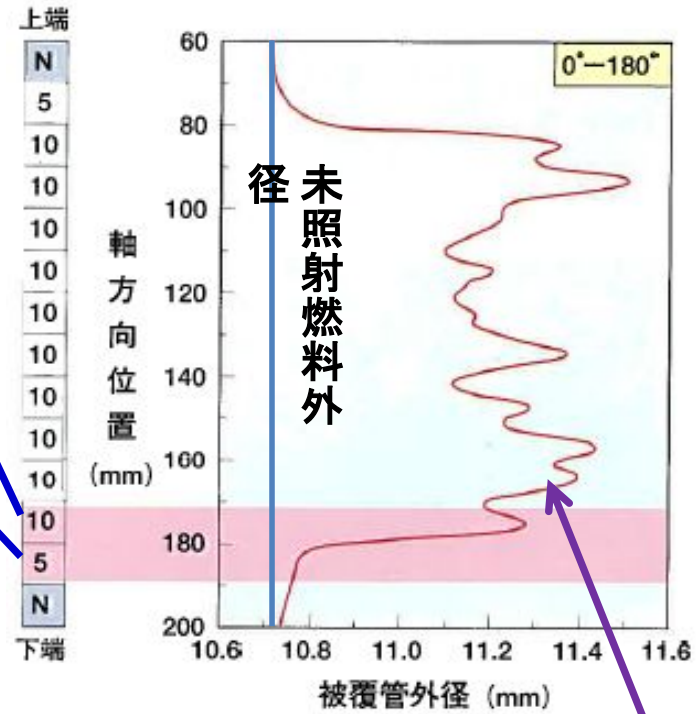


PCMI: Pellet Clad Mechanical Interaction  
 ペレット-被覆管機械的相互作用

# 照射による燃料の影響 (3)



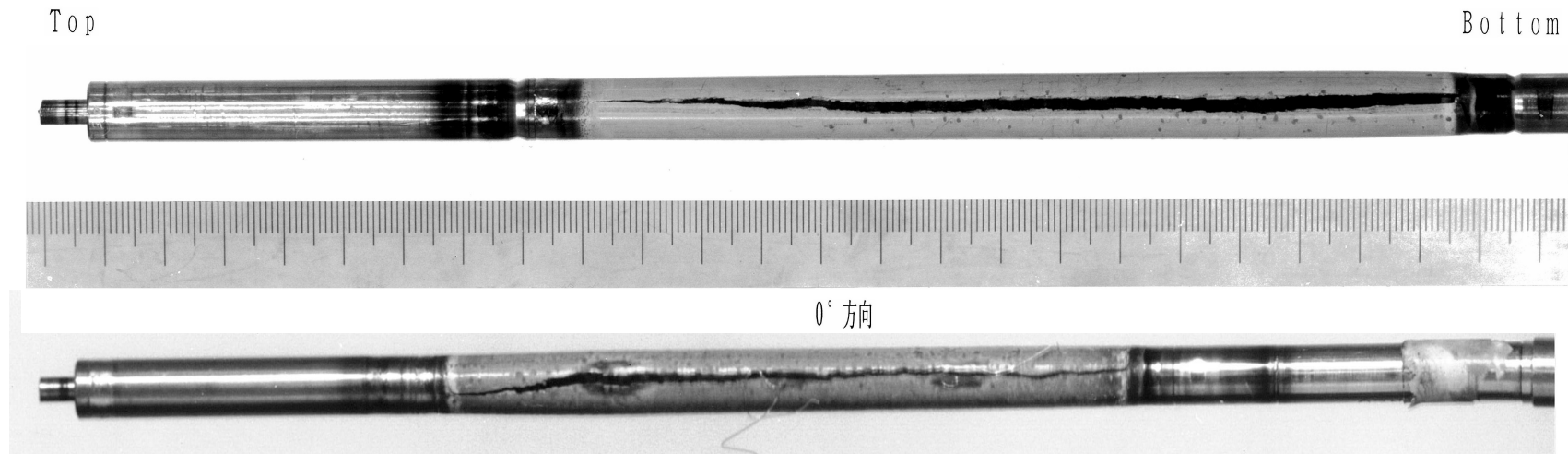
燃料ペレットと被覆管の接触による被覆管の割れ



未照射燃料では見られない  
大きな膨れの発生



# 照射済燃料実験の実験後の燃料

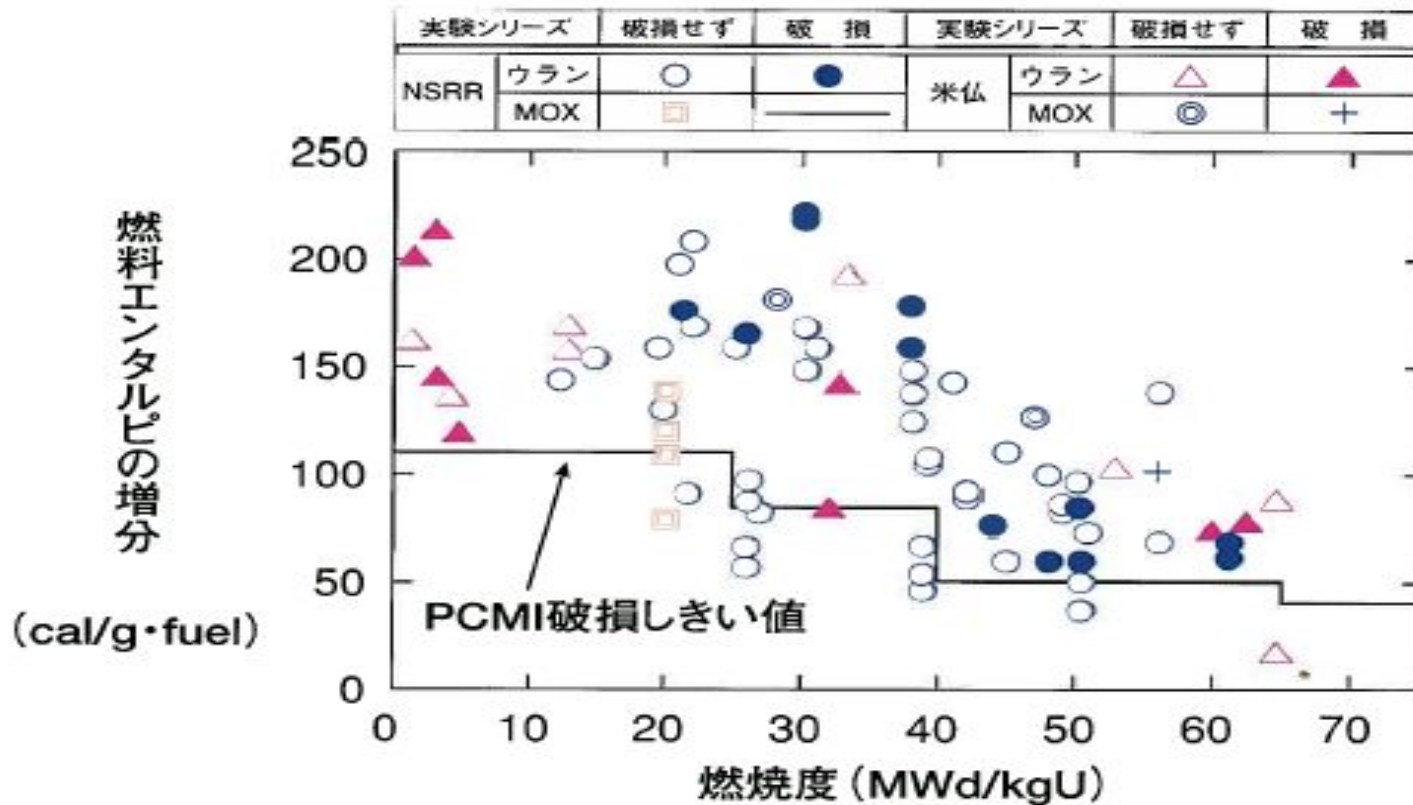


上段  
破損時エンタルピー: : 77cal/g·UO<sub>2</sub>  
燃焼度 : 44 MW·d/kg  
プラント:大飯 17×17 PWR

下段  
破損時エンタルピー: 60 cal/g·UO<sub>2</sub>  
燃焼度 : 48 MW·d/kg  
プラント : 高浜 17×17 PWR

# 燃焼の進んだ燃料に関する評価指針

NSRRにおける照射済燃料実験結果及び米国、フランスの実験結果をベースに原子炉安全基準専門部会において燃焼の進んだ燃料のPCMI破損しきい値が策定された。(2000年)



# ま と め

- 反応度事故については炉内模擬実験等で数多くの知見が得られ、これらの成果は設計基準事故の評価指針に役立てられている。
- また、これらの炉内実験では、軽水炉の内の事象に起因する重大事故時の燃料のふるまいに関して有用な知見が含まれており、積極的に活用する価値があろう。さらに、NSRRにおいて蒸気雰囲気での可視実験も貴重な情報を提供するであろう。
- 反応度事故に関する設計基準事故では、制御棒1本の炉心からの飛び出しを前提としているが、重大事故としては、制御棒2本以上の同時飛び出し、あるいは欠陥燃料の存在した状況にも備え、評価も含め知見を集約しておく必要がある。