



超高燃焼度燃料研究

— 窒化物燃料・酸化物燃料の設計評価結果と課題 —

2011年3月11日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

次世代原子力システム研究開発部門

小澤 隆之

窒化物燃料・酸化物燃料の設計評価

▶ 超高燃焼度燃料の設計評価

- CANDLEで想定される高燃焼度及び高照射量での概略設計評価

【高燃焼度】

- 熱特性(ペレット熱伝導度・ギャップ熱伝達率)の劣化による燃料溶融の可能性
- 核分裂生成ガスの放出に伴うプレナム部内圧の上昇による被覆管のクリープ破損の可能性
- 燃料ペレットスエリングに伴う、燃料-被覆管機械的相互作用(PCMI)の増大による被覆管の機械的破損の可能性

【高照射量】

- 被覆管のボイドスエリング及び照射クリープにより被覆管外径増加が顕著となり、冷却性能が低下する可能性
- 被覆管材料の延性低下が進行することによる脆性破壊の可能性
(延性(伸び)の低下とボイドスエリングによる外径増加率に相関)

- 設計評価項目

- 燃料中心温度(燃料溶融防止)
- 被覆管応力(機械的破損防止)
- クリープ寿命分数和(クリープ破損防止)
- 被覆管外径増加率(脆性破損防止)

設計評価条件

(1) 使用条件

- ▶ 革新燃料の設計で使用する設計条件
 - 到達燃焼度
 - ・ 燃焼期間50年での到達燃焼度を500GWd/tとする。
 - 最大線出力
 - ・ 燃料ペレット径、重金属密度及び到達燃焼度条件に基づき、時間平均の線出力を算出し、それぞれ0.444で除した値を最大線出力条件とする。

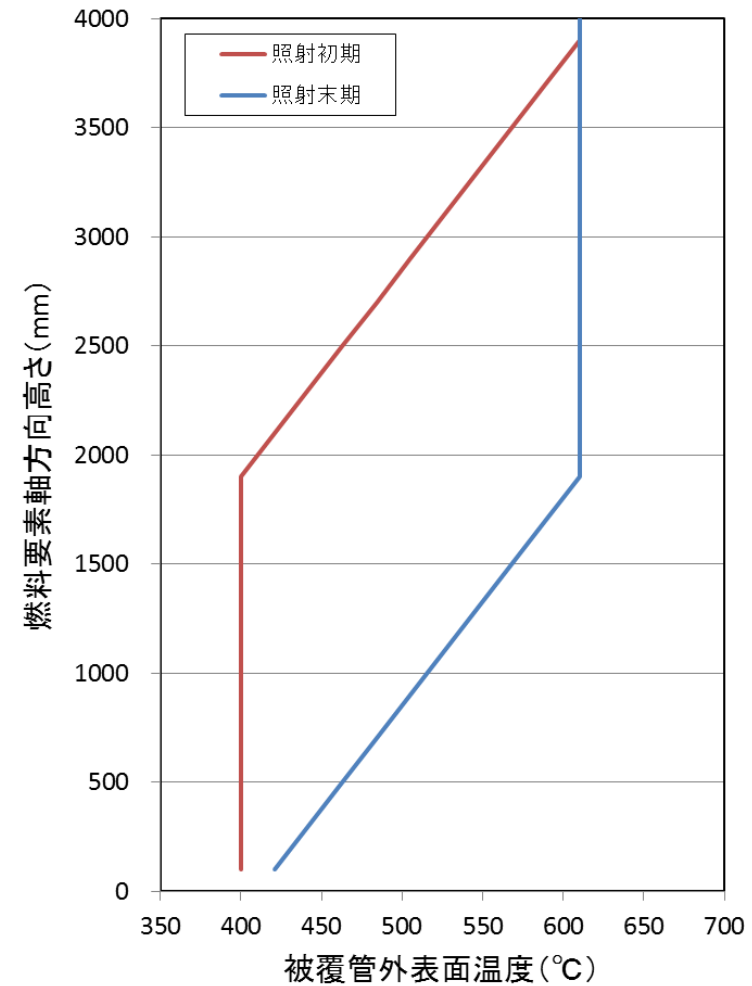
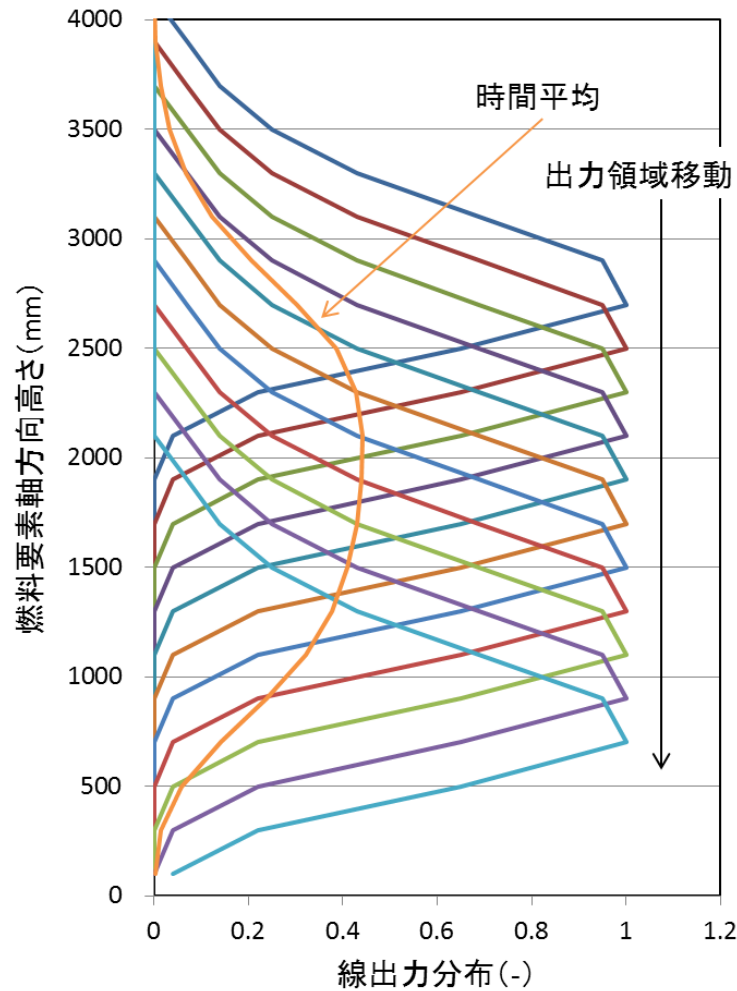
	窒化物燃料	酸化物燃料
最大線出力(W/cm)	360	260
平均線出力(W/cm)	160	115
燃焼(照射)期間(年)	50	50
到達燃焼度(GWd/t)	500	500
高速中性子束(n/cm ² ・sec)	3.8×10^{15}	3.8×10^{15}
高速中性子照射量(n/cm ²)	2.66×10^{24}	2.66×10^{24}
損傷量(dpa)※	1330	1330

※ 2×10^{23} n/cm²=100dpaとして換算

設計評価条件

(2) 軸方向線出力及び被覆管外表面温度分布履歴

- ▶ 出力領域移動速度: 200mm/5years (40mm/year)



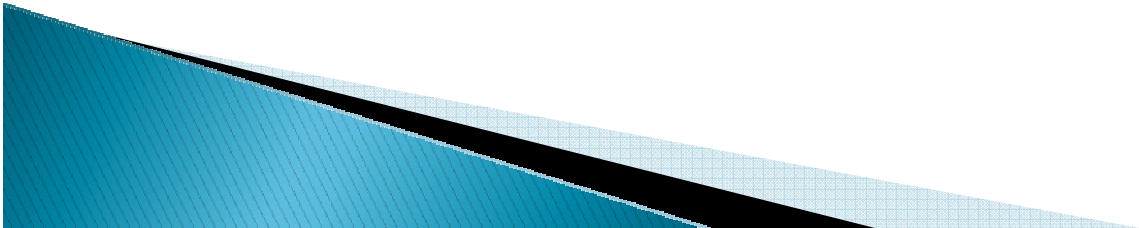
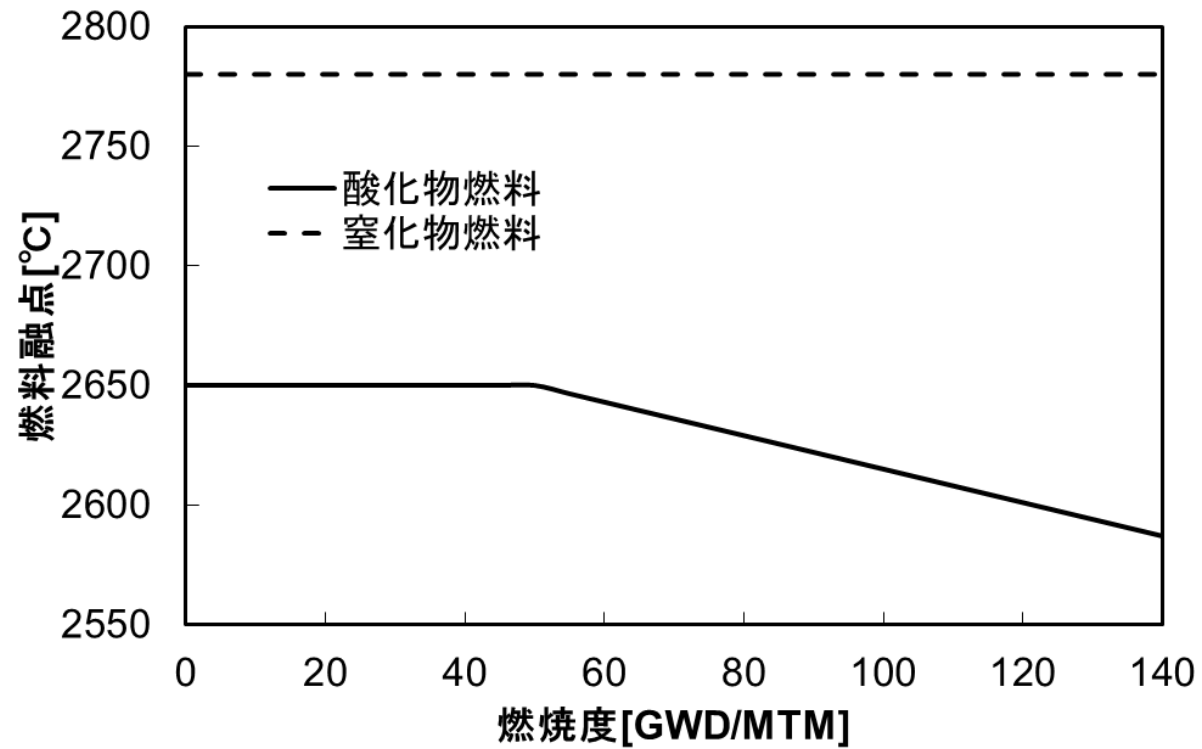
設計評価条件

(3) 燃料仕様条件

	窒化物燃料		酸化物燃料	
	プレナム型	ベント型 (ガス圧上限: 0.2 MPa)	プレナム型	ベント型 (ガス圧上限: 0.2 MPa)
プレナム構造				
被覆管材料	フェライト鋼		フェライト鋼	
被覆管外径 (mm)	9.2	←	9.2	10.2
被覆管内径 (mm)	8.1	←	8.1	9.0
被覆管肉厚 (mm)	0.55	←	0.55	0.60
ペレット-被覆管ギャップ幅 (mm)	0.30	←	0.30	0.35
燃料組成	10wt%PuN-90wt%UN		10wt%PuO ₂ -90wt%UO ₂	
ペレット外径 (mm)	7.80	←	7.80	8.65
ペレット内径 (mm)	-	-	-	2.0
燃料密度 (重金属密度) (g/cm ³)	14.2(13.5)	←	11.0(9.7)	←
ペレット密度 (%T.D.)	90	←	90	95
スミア密度 (%T.D.)	83	←	83	←
燃料スタック長 (mm)	4,000	←	4,000	←
プレナム長 (mm)	9,000	-	6,500	-
ボンド材	He	←	He	←

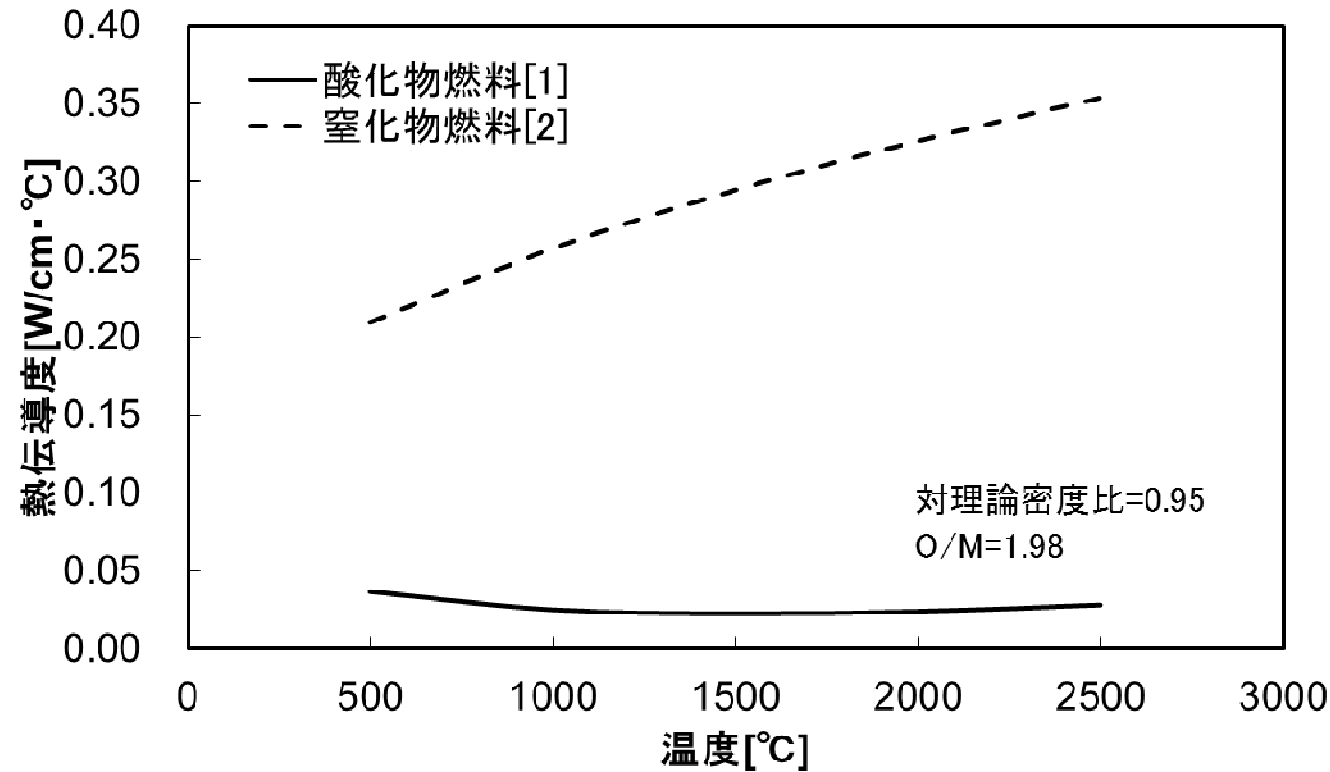
燃料物性

(1) 燃料熔点(窒化物・酸化物)



燃料物性

(2) 燃料熱伝導度(窒化物・酸化物)

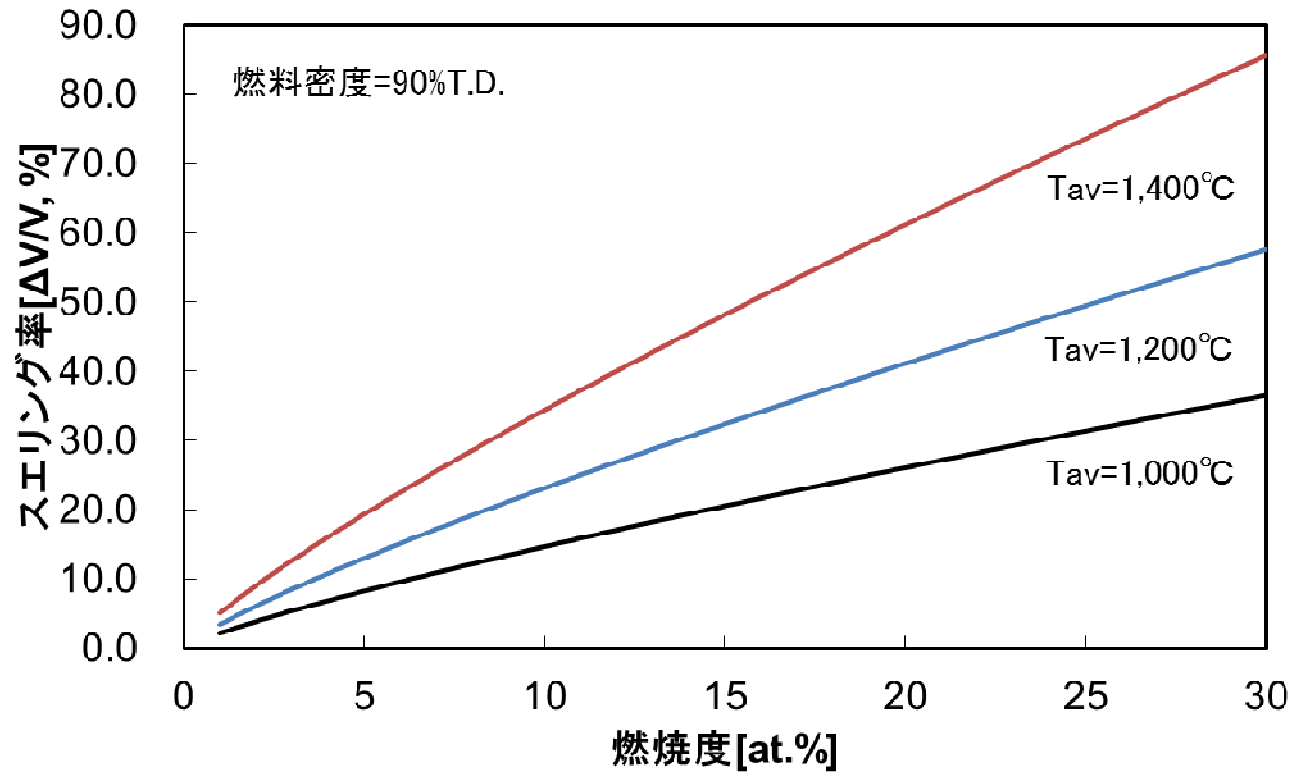


[1] Hilbert, R.F., Cantley, D.E., "Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE II", GEAP-13967 (1973).

[2] Steven B. ROSS, Mohamed S. EL-GENK, and R. Bruce MATTHEWS, "Thermal Conductivity Correlation for Uranium Nitride Fuel between 10 And 1923 K", J. Nucl., Mat., 151(1988)313-317.

燃料物性

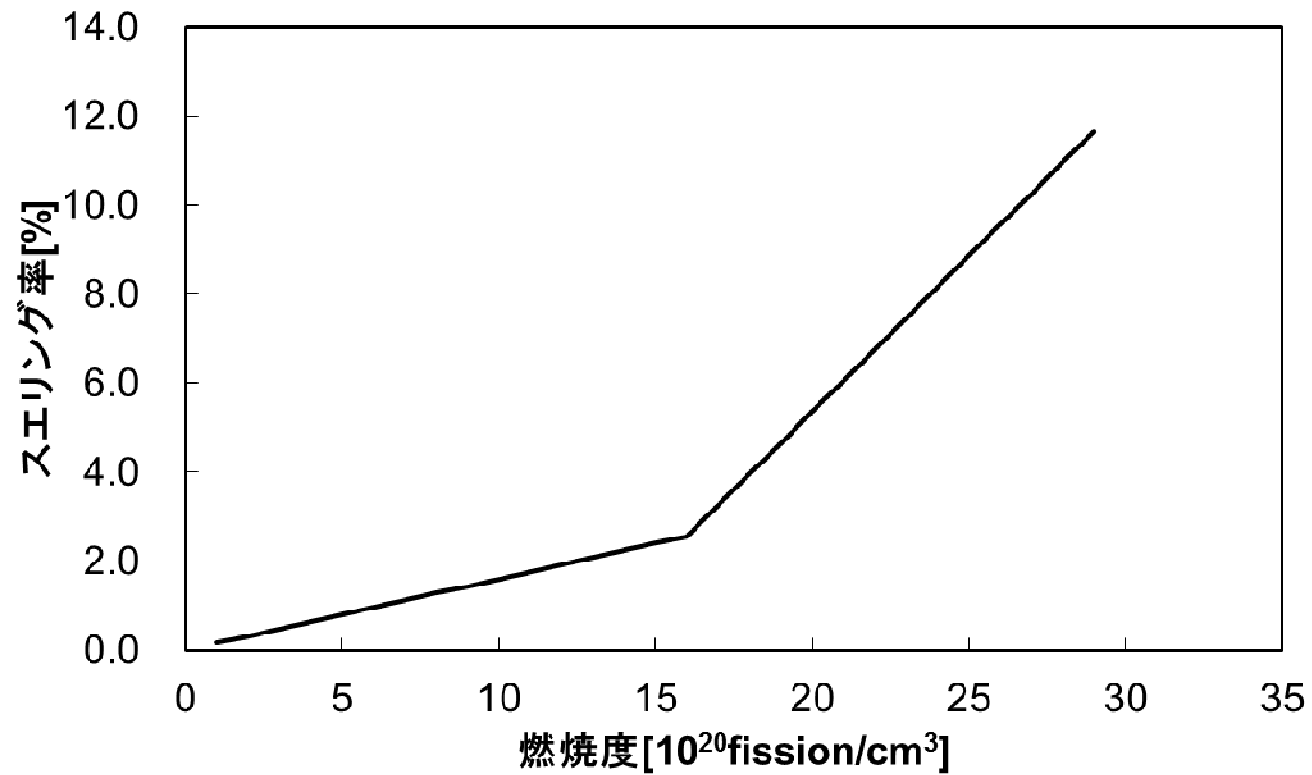
(3) ペレットスエリング(窒化物)



[3] Steven B. ROSS, Mohamed S. EL-GENK, and R. Bruce MATTHEWS, "Uranium Nitride Fuel Swelling Correlation", J. Nucl., Mat., 170(1990)169-177.

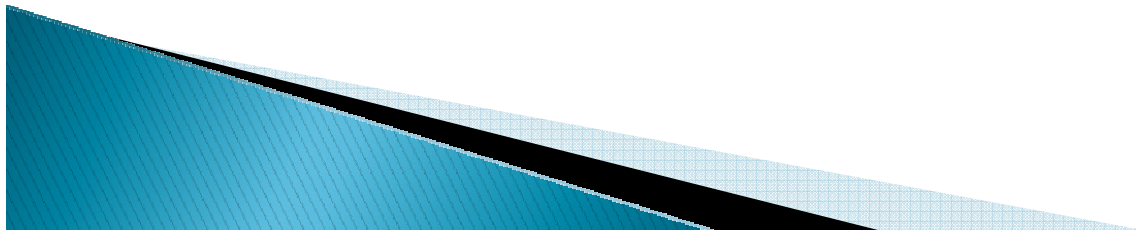
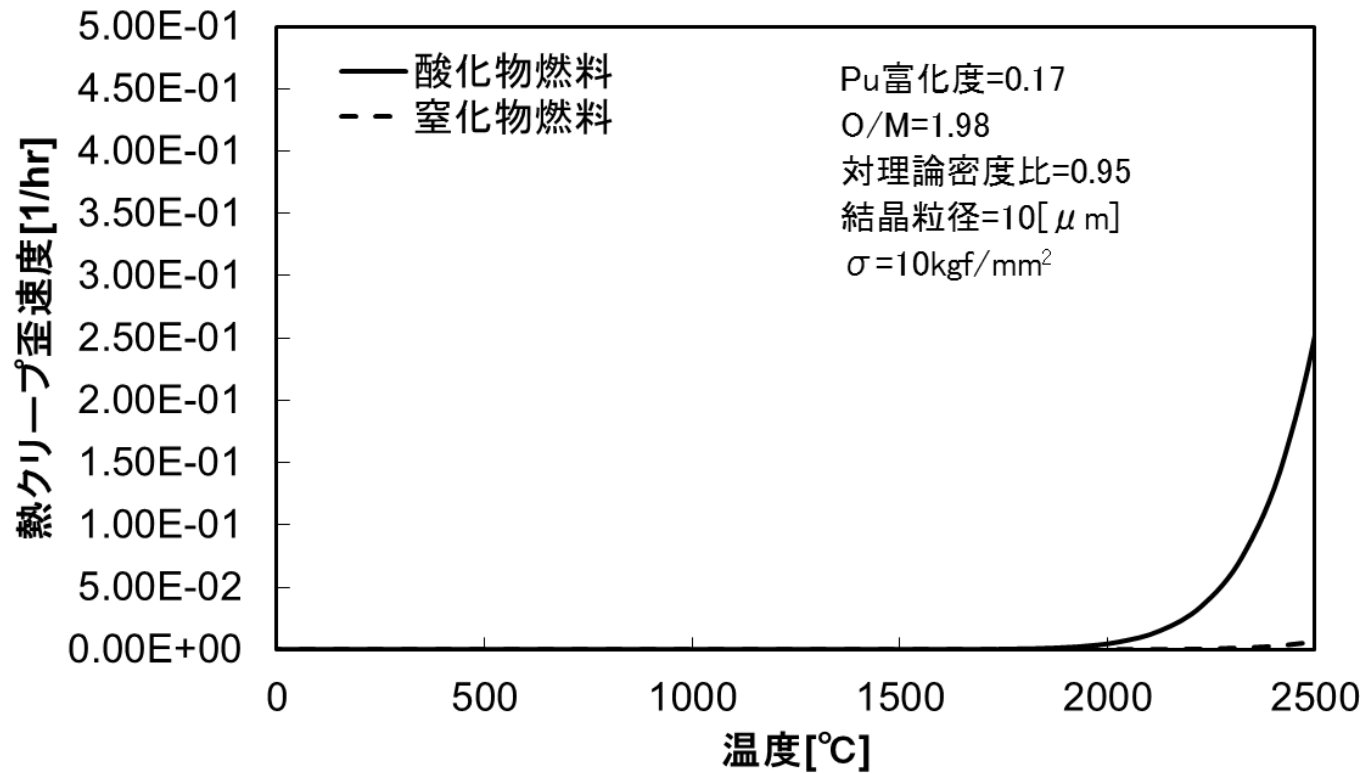
燃料物性

(4) ペレットスエリング(酸化物)



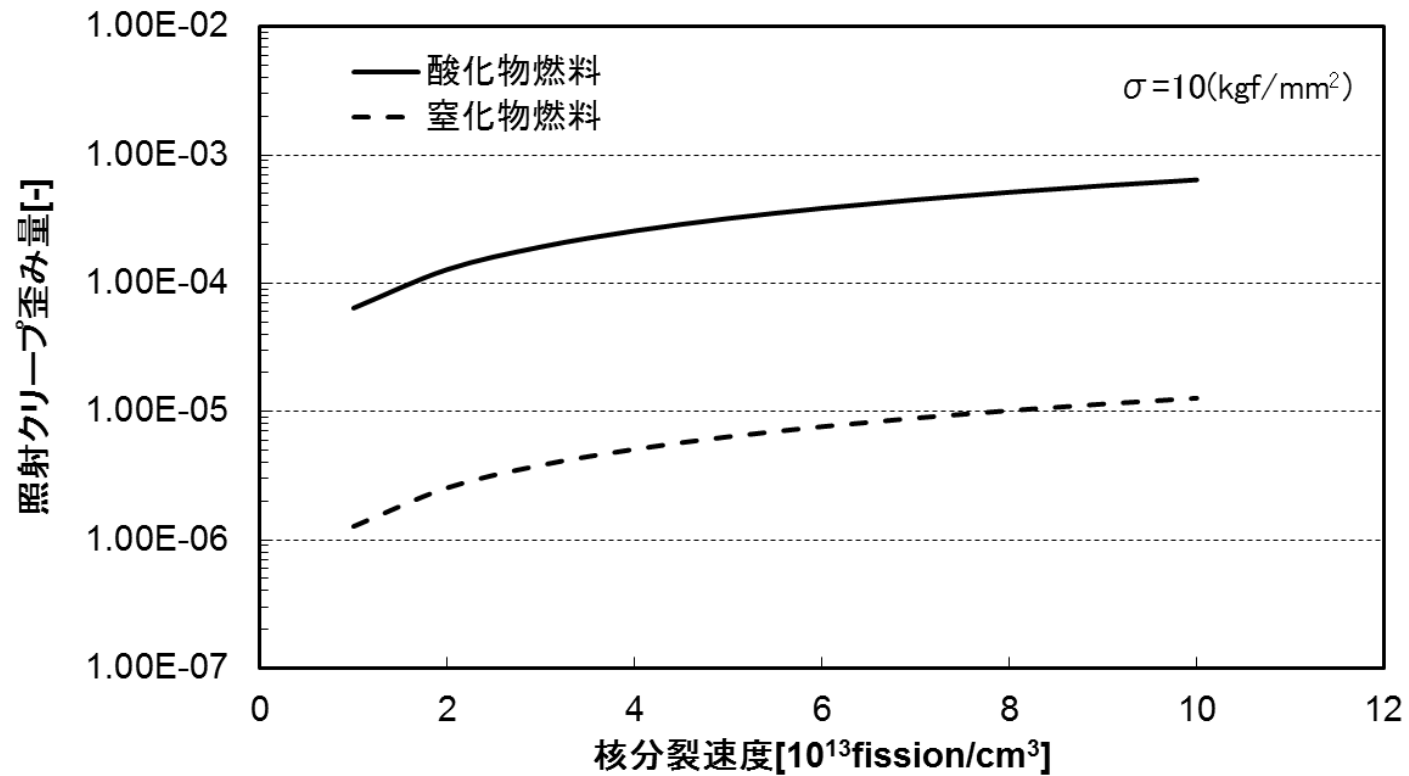
燃料物性

(5) 燃料熱クリープ(窒化物・酸化物)



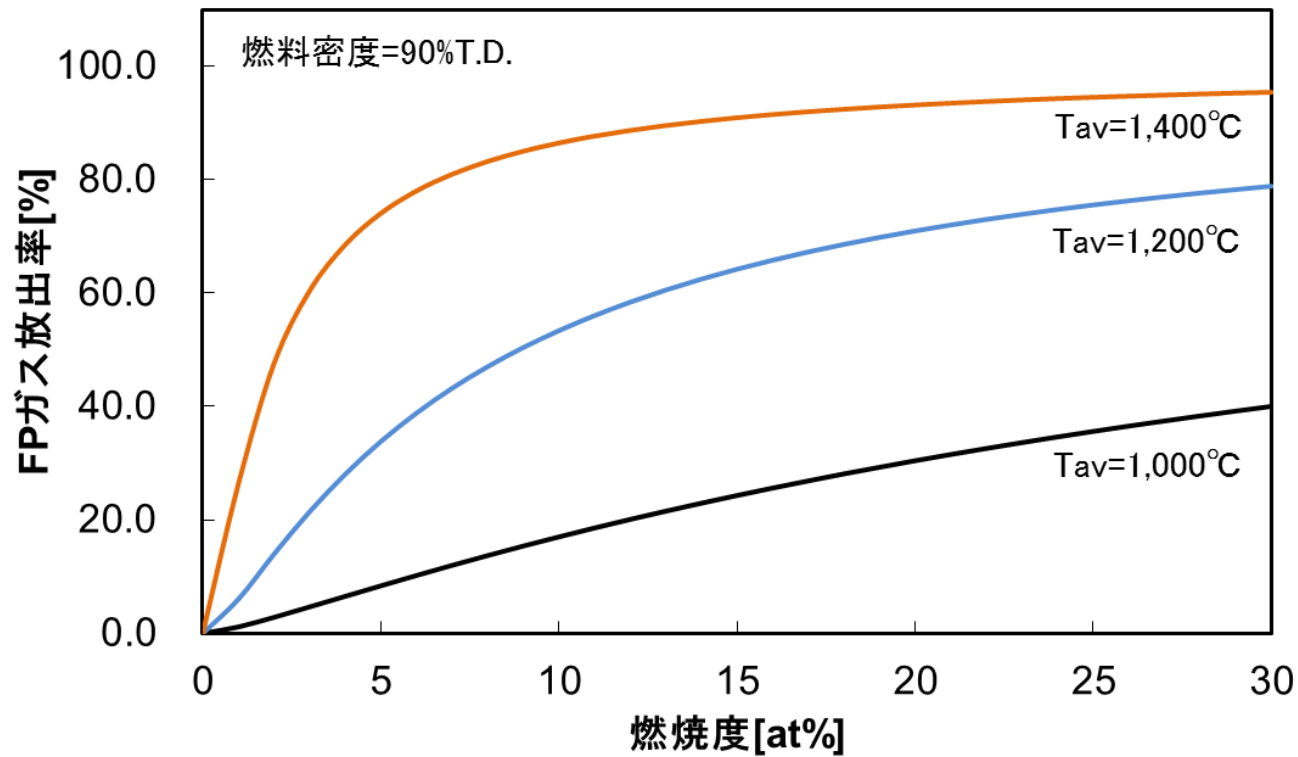
燃料物性

(6) 照射クリープ(窒化物・酸化物)



燃料物性

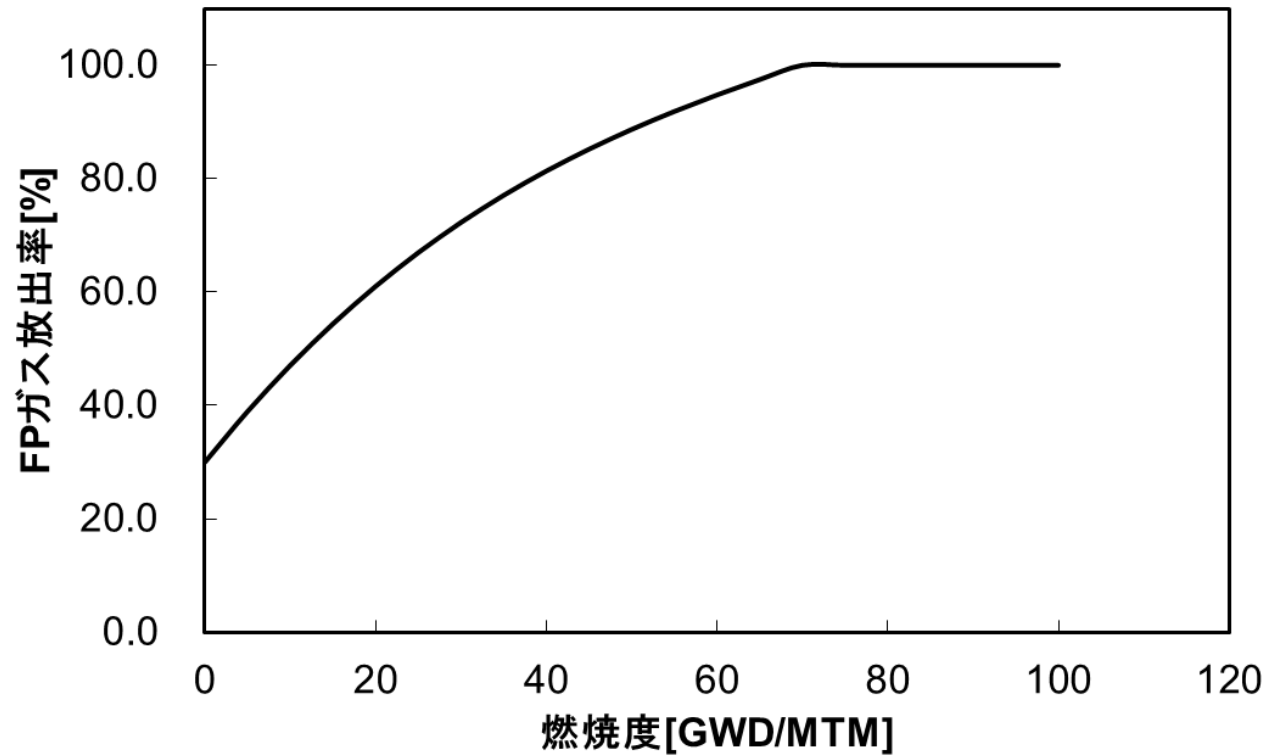
(7) FPガス放出率(窒化物)



[4] E.K. STORM, "An Equation Which Describes Fission Gas Release from UN Reactor Fuel", J. Nucl., Mat., 158(1988)119-129.

燃料物性

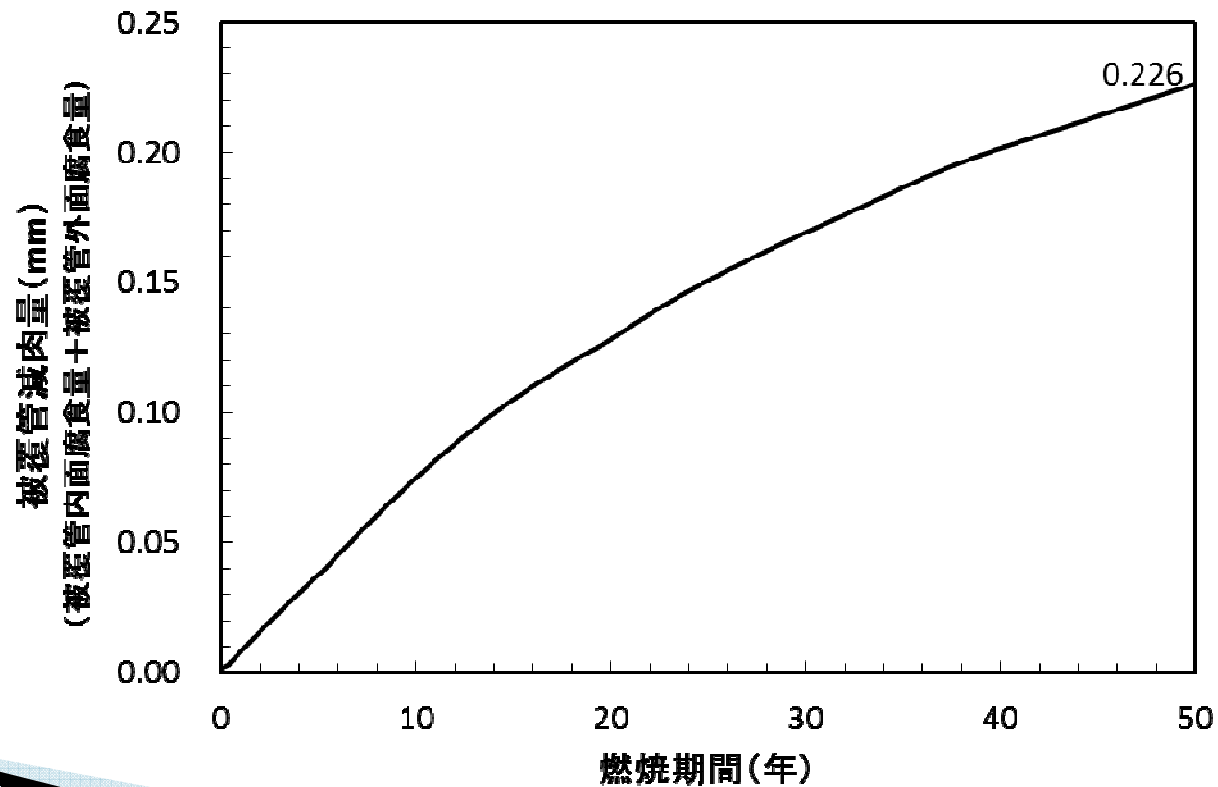
(8) FPガス放出率(酸化物)



被覆管内外面腐食

— 窒化物燃料・酸化物燃料 —

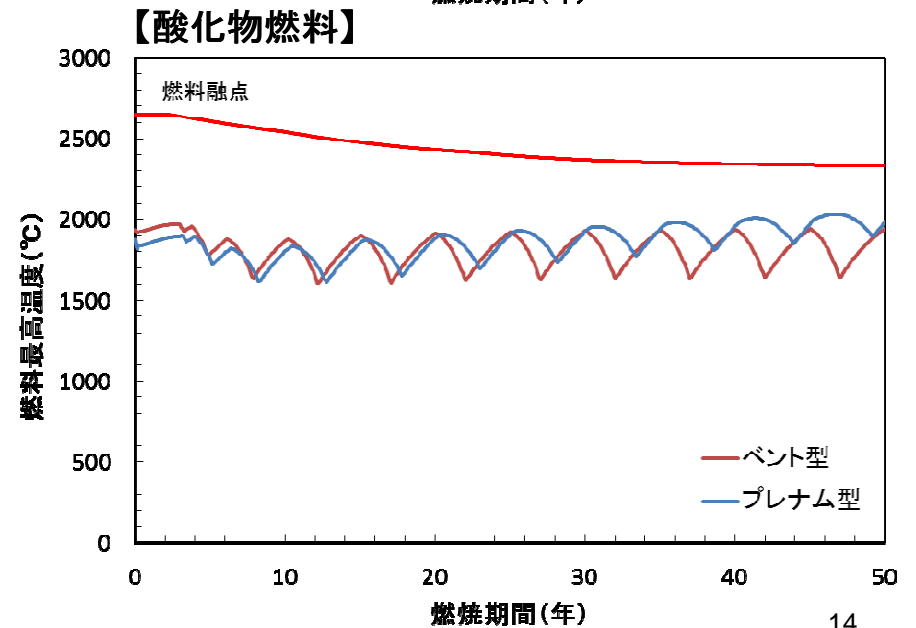
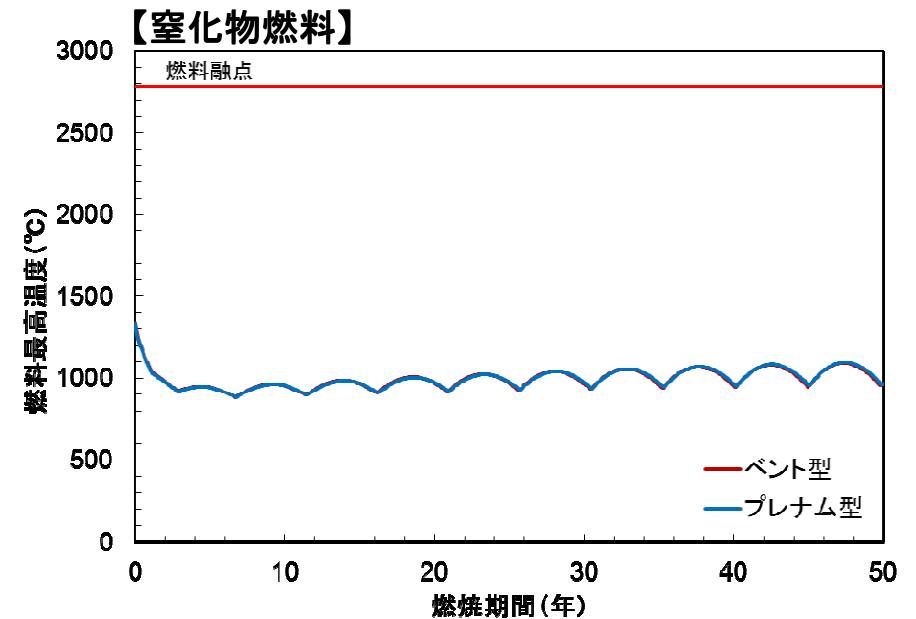
- ▶ 被覆管内外面腐食量(燃烧末期): 226 (μm)
 - 燃烧度が最大となる軸方向高さ \approx 2,000(mm)付近で肉厚最小
- ▶ 被覆管応力評価について減肉量を考慮



設計評価結果

(1) 燃料中心温度(最高温度)

- ▶ 窒化物燃料
 - プレナム型・ベント型:
 - ・ 約1,330°C < 燃料融点(2,780°C)
- ▶ 酸化物燃料
 - プレナム型・ベント型:
 - ・ 約2,000°C < 燃料融点(燃焼度依存性考慮)
- ▶ 燃焼期間を通じ、燃料中心温度の最高温度は燃料融点を下回り、燃料溶解は防止されるものと考えられる。



設計評価結果

(2) 燃料ピン内圧

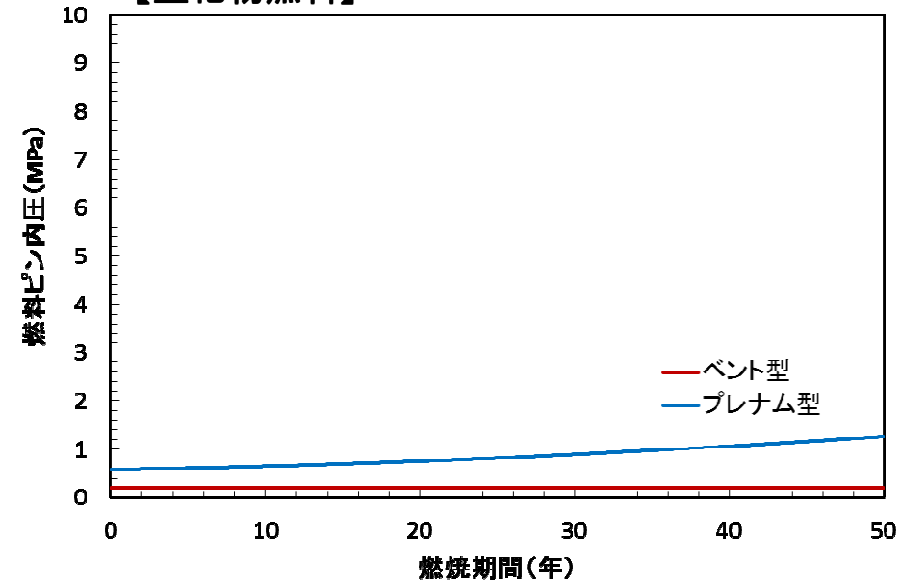
▶ 窒化物燃料

- プレナム型：
 - ・ 燃料ピン内圧(燃焼末期)：約1.3 MPa
- ベント型：
 - ・ ガス圧上限約0.2 MPaで推移

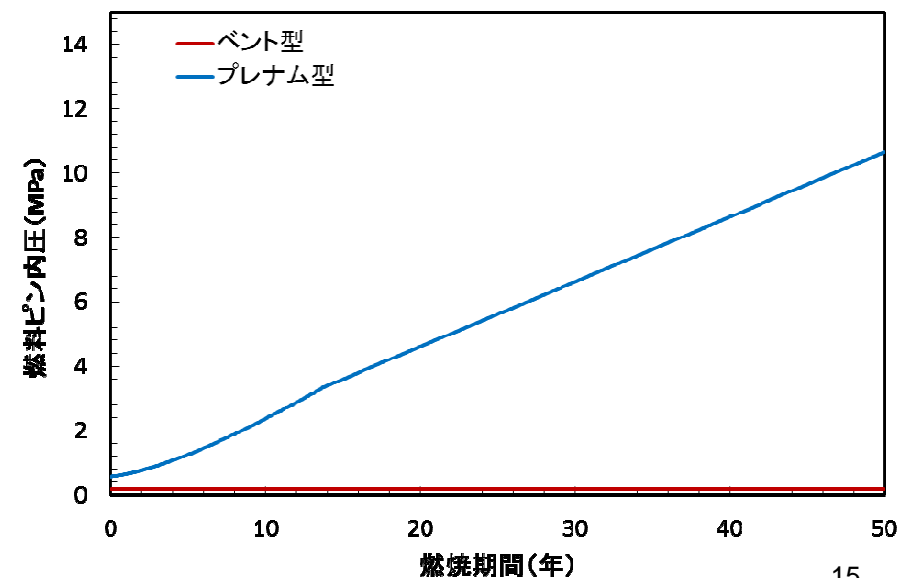
▶ 酸化物燃料

- プレナム型：
 - ・ 燃料ピン内圧(燃焼末期)：約11 MPa
 - ・ 酸化物燃料のFPガス放出率は窒化物燃料に比べ、比較的大きい。
- ベント型：
 - ・ ガス圧上限約0.2 MPaで推移

【窒化物燃料】



【酸化物燃料】



設計評価結果

(3) PCMI応力

▶ 窒化物燃料

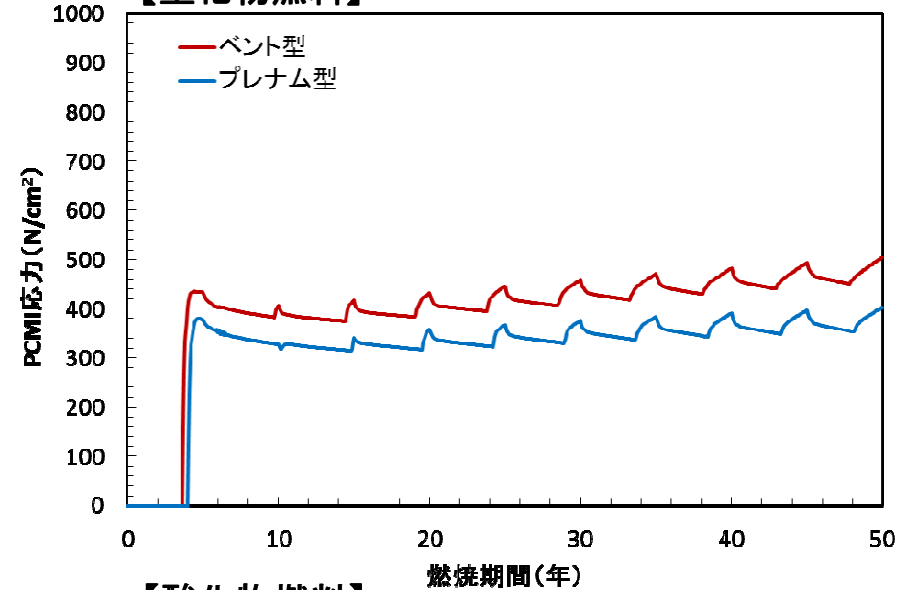
- プレナム型:
 - PCMI応力最大値: 402 N/cm²
- ベント型:
 - PCMI応力最大値: 504 N/cm²
 - 被覆管の内圧クリープが低下することによりPCMI応力はプレナム型に比べて増加する。

▶ 酸化物燃料

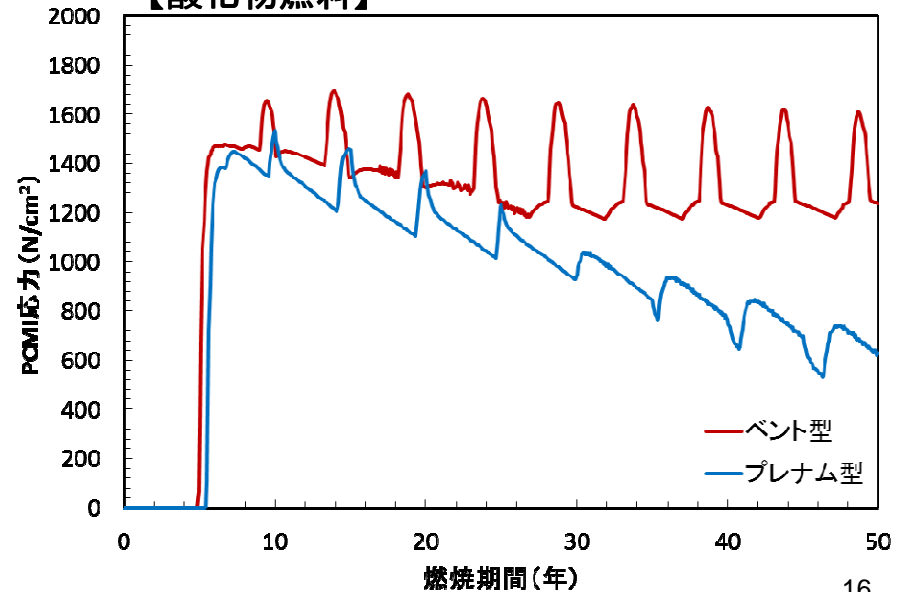
- プレナム型:
 - PCMI応力最大値: 1,534 N/cm²
- ベント型:
 - PCMI応力最大値: 1,695 N/cm²
 - ベント型では、被覆管の内圧クリープが低下することによりPCMI応力はプレナム型に比べて増加する。

- EPガス放出率が高いため、被覆管の内圧クリープの寄与が大きい。

【窒化物燃料】



【酸化物燃料】

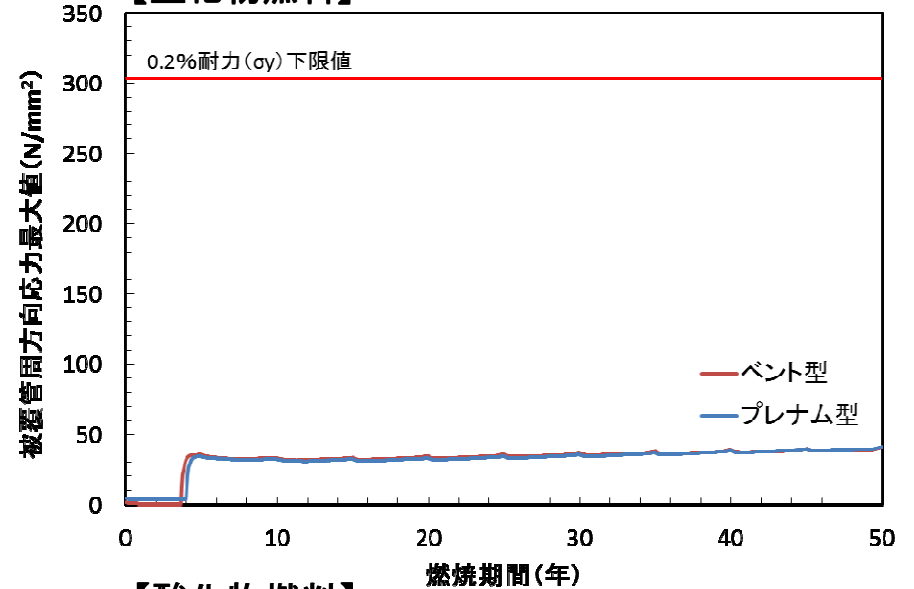


設計評価結果

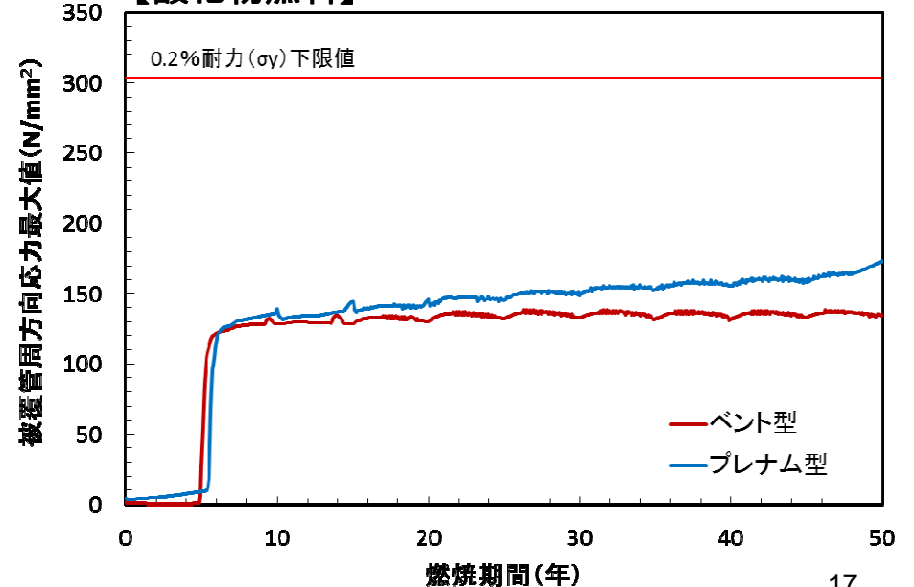
(4) 被覆管周方向応力(最大値)

- 窒化物燃料
 - プレナム型・ベント型:
 - 被覆管周方向応力最大値: 約41 N/mm²
 - 燃焼期間を通じて0.2%耐力(σ_y)の下限値約304 N/mm²を下回る結果となった。
- 酸化物燃料
 - プレナム型:
 - 被覆管周方向応力最大値: 約173 N/mm²
 - ベント型:
 - 被覆管周方向応力最大値: 約135 N/mm²
 - 燃焼期間を通じて0.2%耐力(σ_y)の下限値約304 N/mm²を下回る結果となった。
- 燃焼期間を通じ、被覆管周方向応力は0.2%耐力を下回ることから、被覆管の機械的破損は防止されるものと考えられる。

【窒化物燃料】



【酸化物燃料】



設計評価結果

(5) クリープ寿命分数和(CDF)

■ 窒化物燃料

□ プレナム型・ベント型:

- CDF(燃焼末期) $\approx 2.0 \times 10^{-4} < 1$

■ 酸化物燃料

□ プレナム型:

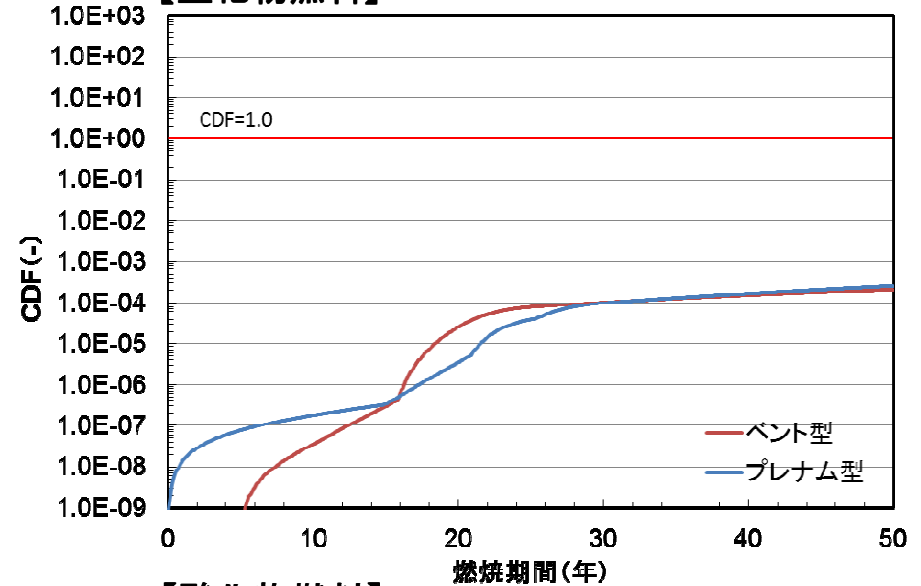
- CDF > 1 (燃焼開始から約27年後)

□ ベント型:

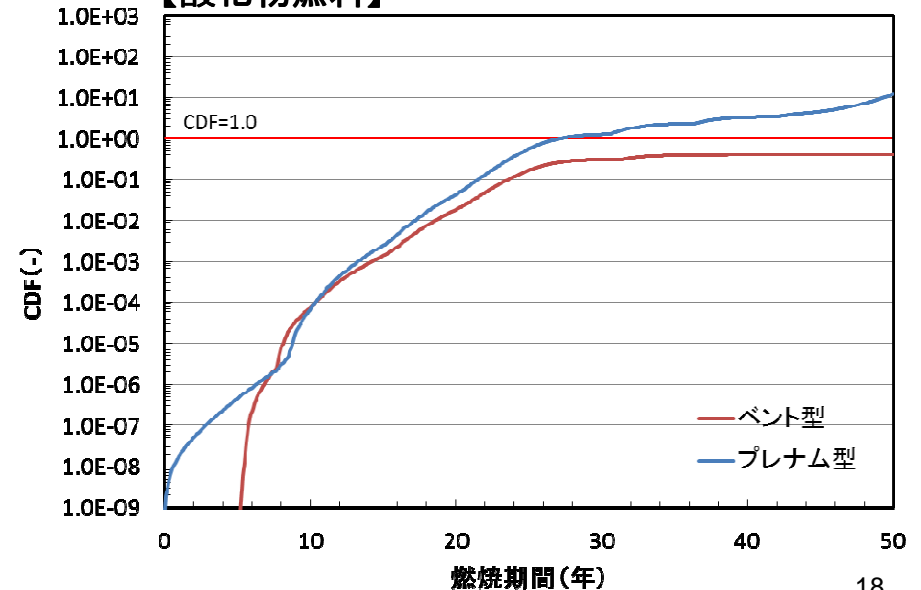
- CDF(燃焼末期) $\approx 0.4 < 1$

- 酸化物燃料では、ベント型にすることによってCDFは1を下回り、窒化物燃料、酸化物燃料ともに被覆管のクリープ破損は防止されるものと考えられる。

【窒化物燃料】



【酸化物燃料】

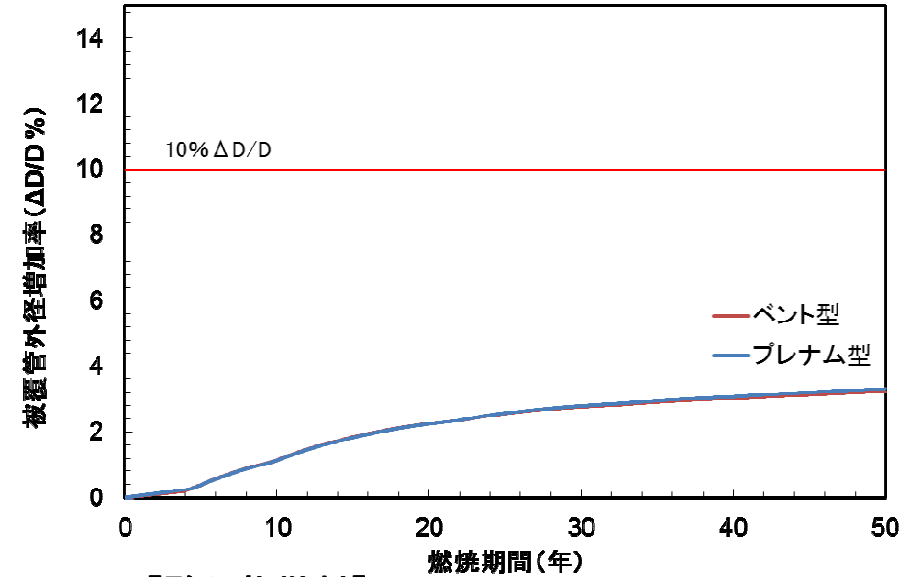


設計評価結果

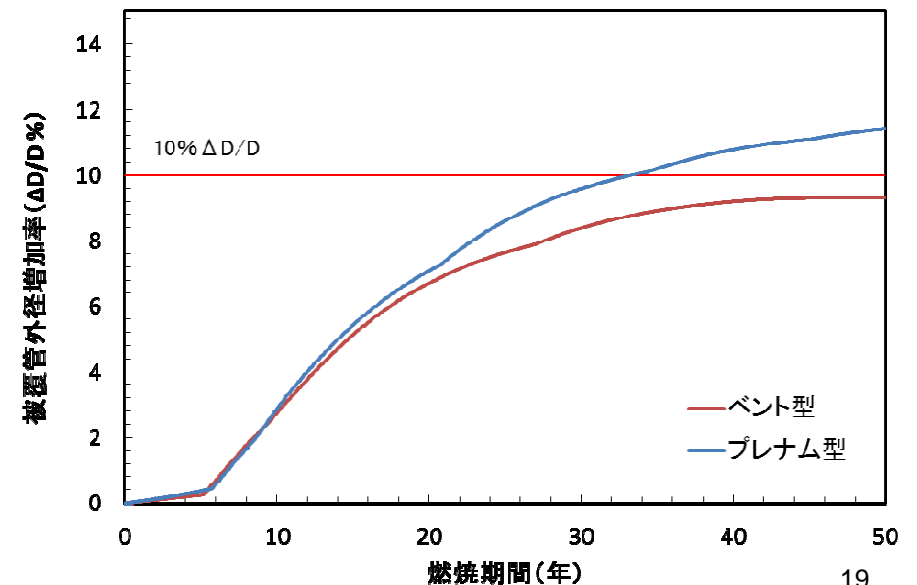
(6) 被覆管外径増加率

- 窒化物燃料
 - プレナム型・ベント型:
 - 被覆管外径増加率(燃焼末期)
 $\approx 3\% \Delta D/D < 10\% \Delta D/D$
- 酸化物燃料
 - プレナム型:
 - 被覆管外径増加率 $> 10\% \Delta D/D$
 (燃焼開始から約33年後)
 - ベント型:
 - 被覆管外径増加率(燃焼末期)
 $\approx 9\% \Delta D/D < 10\% \Delta D/D$
- 酸化物燃料では、ベント型にすることによって、被覆管外径増加率は10% $\Delta D/D$ を下回り、窒化物燃料、酸化物燃料ともに被覆管の脆性破損は防止されるものと考えられる。

【窒化物燃料】



【酸化物燃料】



設計評価結果のまとめ

－窒化物燃料・酸化物燃料－

- ▶ 燃料中心温度(最高温度) < 燃料融点
 - 窒化物燃料: プレナム型・ベント型 約1,330°C < 燃料融点
 - 酸化物燃料: プレナム型・ベント型 約2,000°C < 燃料融点
- ▶ 被覆管周方向応力(最大値) < 0.2%耐力 ($\sigma_y \geq 304 \text{ N/mm}^2$)
 - 窒化物燃料: プレナム型・ベント型 約41 N/mm² < σ_y 下限値
 - 酸化物燃料: プレナム型 約173 N/mm² < σ_y 下限値
 - ベント型 約135 N/mm² < σ_y 下限値
- ▶ クリープ寿命分数和(CDF) < 1
 - 窒化物燃料: プレナム型・ベント型 CDF $\doteq 2.0 \times 10^{-4} < 1$
 - 酸化物燃料: ベント型 CDF $\doteq 0.4 < 1$
- ▶ 被覆管外径増加率 < 10% $\Delta D/D$
 - 窒化物燃料: プレナム型・ベント型 約3.3% $\Delta D/D < 10\%$
 - 酸化物燃料: ベント型 約9.3% $\Delta D/D < 10\% \Delta D/D$

超高燃焼度燃料実現に向けた課題

－ 窒化物燃料・酸化物燃料 －

▶ 燃料設計評価

- 燃料ペレットスエリング挙動評価：燃焼期間中における燃料ペレットのスエリング挙動を明らかにする必要がある。（クリープ寿命分数和に及ぼすPCMIの影響評価）
- 燃料物性（熱伝導度、融点等）：燃焼による燃料物性の変化が顕著となることが考えられ、関連する物性研究が必要である。

▶ 燃料材料開発

- 高照射量での中性子照射等による被覆管強度への影響（クリープ強度低下）について確認する必要がある。

▶ 燃料製造技術

- 被覆管腐食による減肉を抑制する目的で低O/M化（酸化物燃料）する必要があり、燃料製造技術開発が必要である。

▶ 燃料取扱技術

- 燃焼期間中における被覆管外径増加を考慮した燃料交換方法について検討する必要がある。

▶ その他

- プレナム型燃料ピンを採用する場合、被覆管の長尺化に関連し、許容曲り量及び製作上想定される曲り量に関する検討が必要である。