

革新的原子力システムにおける 燃料燃焼概念及び燃料材料の選定

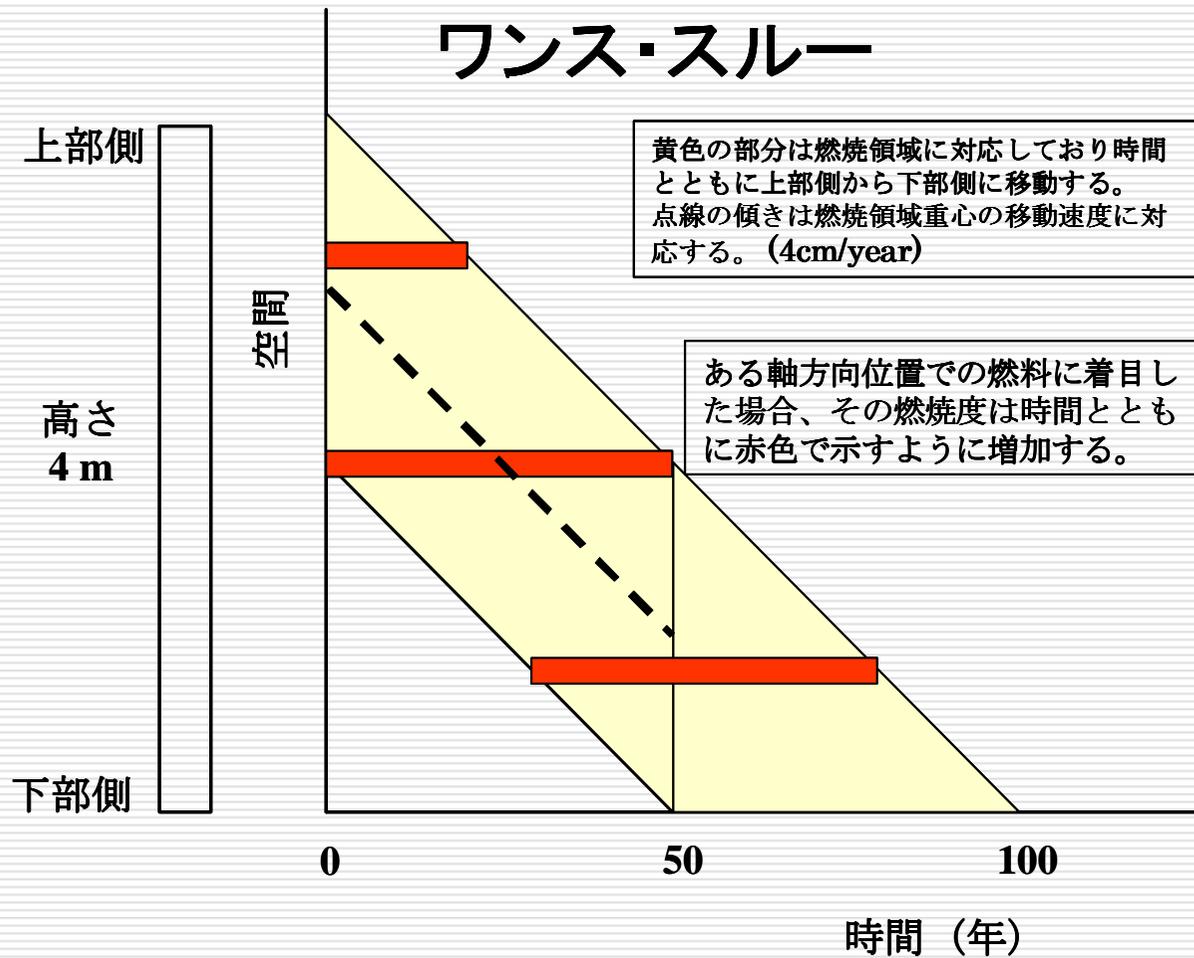
中江 延男

東京工業大学 革新的原子力研究センター

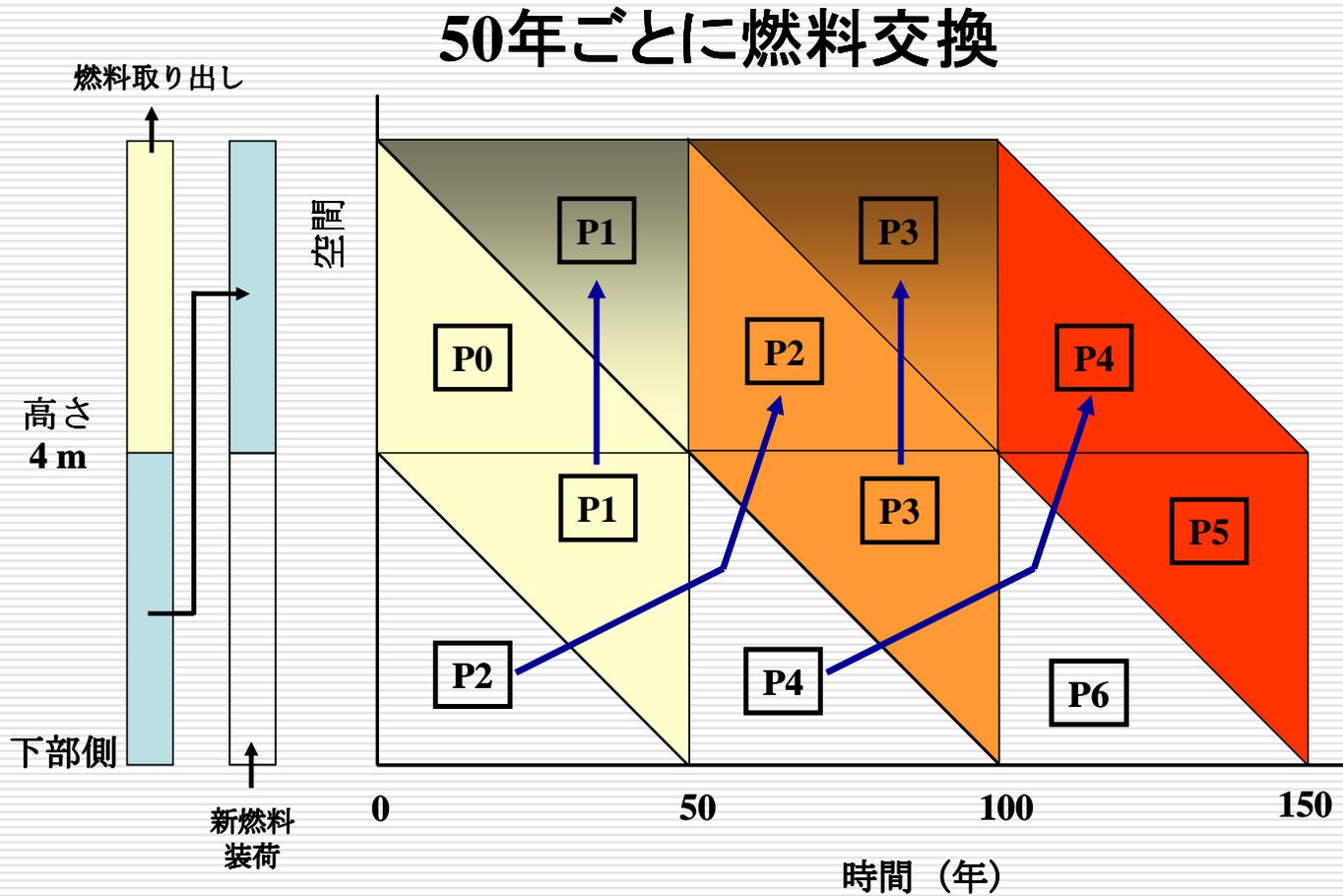
CRINESセミナー

2011年3月11日、東京工業大学 原子炉工学研究所

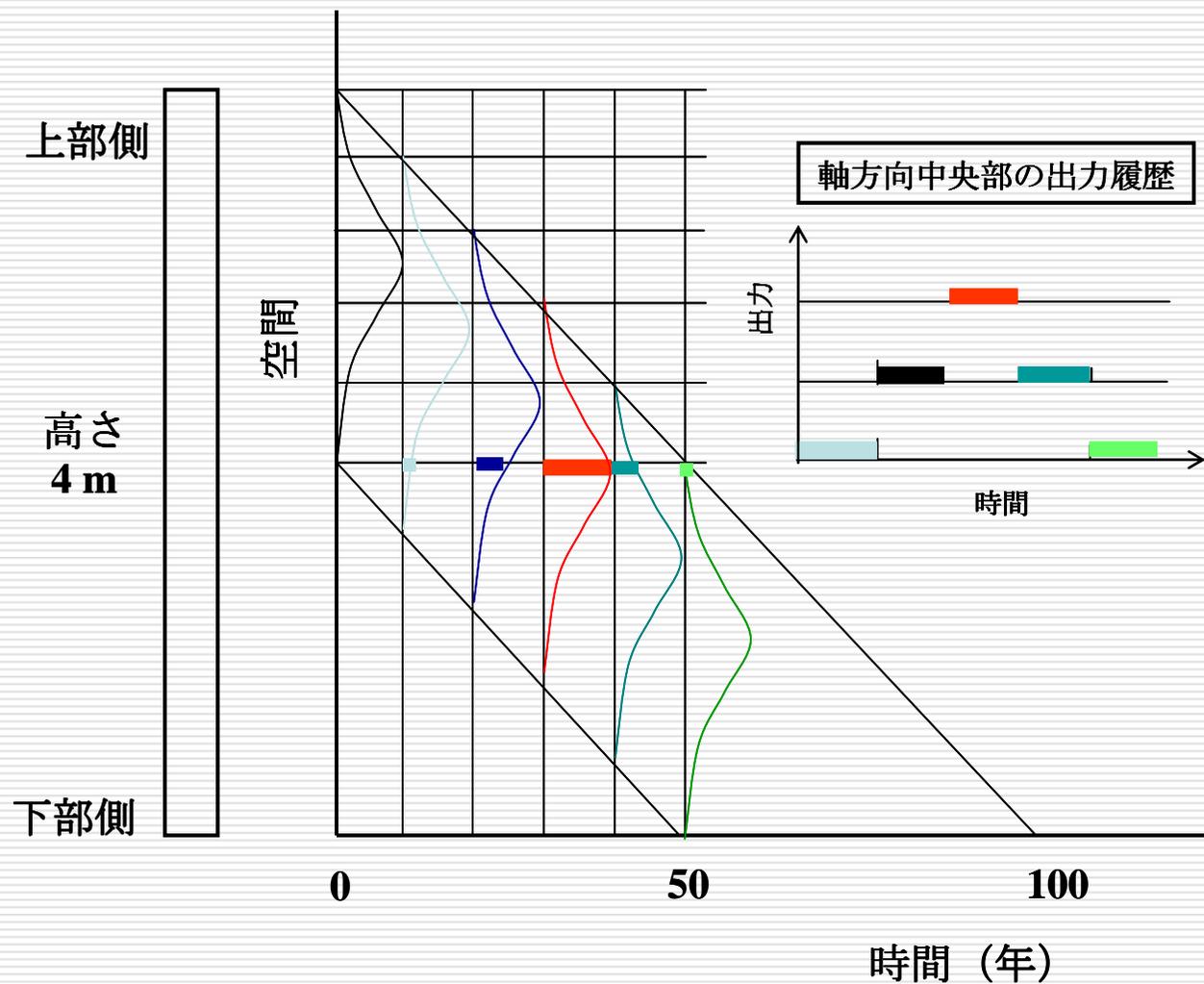
燃料燃焼概念



燃料燃焼概念



燃料燃焼概念



燃料設計条件

	金属燃料	窒化物燃料	酸化物燃料
最大線出力(W/cm)	400	340	230
平均線出力(W/cm)	178	151	102
燃焼期間(年)	50	50	50
到達燃焼度(GWd/t)	500	500	500
高速中性子束(n/cm ² ·s)	3.8×10^{15}	3.8×10^{15}	3.8×10^{15}
高速中性子照射量(n/cm ²)	26.6×10^{23}	26.6×10^{23}	26.6×10^{23}
損傷量(dpa)	1330	1330	1330

50年の燃焼期間で燃焼度500GWd/tを達成するように平均線出力を算出した。
最大線出力は平均線出力をピーキング係数(0.444)を考慮して算出した。
 $100\text{dpa} = 2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$

燃料仕様

	金属燃料	窒化物燃料	酸化物燃料(参考)
被覆材	オーステナイト系/フェライト系		
被覆管外径(mm)	10.2	9.2	9.2
被覆管内径(mm)	9.0	8.1	8.1
被覆管肉厚(mm)	0.6	0.55	0.55
ギャップ幅(mm)	1.2	0.3	0.3
燃料組成 (燃焼が進んだ場合)	81wt%U-9wt%Pu- 10wt%Zr	10wt%PuN- 90wt%UN	10wt%PuO ₂ - 90wt%UO ₂
ペレット径(mm)	7.8	7.8	7.8
燃料密度(g/cm ³)	15.8	14.2	11.5
重金属密度(g/cm ³)	14.2	13.5	10.1
ペレット密度(%TD)	100	90	90
スミア密度(%TD)	75	83	83
燃料スタック長(m)	4.0	4.0	4.0
プレナム長(m)	8.5	9.0	6.5
ボンド材	ナトリウム	ヘリウム	ヘリウム

燃料材料の選定

燃料材の選定

- 高速炉の燃料として現在までに開発されてきた燃料材は、合金(金属)、酸化物、炭化物、窒化物のいずれかである。これら以外の燃料材の可能性に関する検討・評価は必要であるが、ここでは従来から開発が進められている燃料材を対象にその中から本研究に用いるものを選定することとした。
- 革新燃料には、良好な核特性と熱特性、そして燃料健全性上のタフさが要求される。核特性や熱特性の観点からは金属燃料、窒化物燃料が優れることはよく知られている。一方、燃料健全性上のタフさという観点では、燃焼実績のある酸化物燃料が優れていると考えられる。
- そこで、本研究では金属燃料を第1候補とし窒化物燃料をその代替と考えた。また、酸化物燃料は多くの経験を有していることからレファレンスと位置づけた。

燃料材料の選定

被覆材の選定

- 被覆材については現在までに世界各国で耐スエリング性等に優れた材料の開発が進められている。
- 具体的には、オーステナイト系ステンレス鋼では、PNC316(日)、15-15Ti(仏)、D9(米)、PE-16(英)が開発されている。また、フェライト系(または、フェライト/マルテンサイト系)ステンレス鋼では、PNC-FMS(日)、EM-12(仏)、HT-9(米)、酸化物分散強化型ステンレス鋼では、ODS(日)などが開発されておりその特性式が得られている。
- しかし、革新燃料設計では将来の候補材を対象として設計を進めることが合理的であることから必ずしも各機関が開発した材料特性式を使用する必要はない。
- そこで、本研究においては、被覆材の重要な特性であるスエリング、照射クリープ、クリープ強度について基礎式を導出し、式に含まれるパラメータをJAEAが開発を進めてきたPNC316及びPNC-FMSの特性データを用いて決定した。

燃料設計条件の比較

	金属燃料	窒化物燃料	酸化物燃料	従来燃料 (もんじゅ)
最大線出力(W/cm)	400	340	230	360
燃焼期間(年)	50	50	50	2
到達燃焼度(GWd/t)	500	500	500	130
高速中性子束(n/cm ² ・s)	3.8×10^{15}	3.8×10^{15}	3.8×10^{15}	3.6×10^{15}
高速中性子照射量(n/cm ²)	26.6×10^{23}	26.6×10^{23}	26.6×10^{23}	2.3×10^{23}
損傷量(dpa)	1330	1330	1330	120

従来燃料と革新燃料の設計条件では、燃焼度が4倍、損傷量が10倍異なる。

革新燃料設計上の考慮すべき事項

従来燃料と革新燃料の設計条件では、燃焼度が4倍、損傷量が10倍異なる。

燃焼度が4倍異なる。

このことは、燃料の固体スエリングによる体積膨張を考慮する必要がある。FPガスはこのような超高燃焼度ではほとんどがペレット外に放出される。これに伴う、FPガス内圧を考慮する必要がある。また、FPガスが抜けた跡のFPガスバブルが気孔として残存するのか、ハードなFCMIによる消失の可能性について確かめる必要がある。

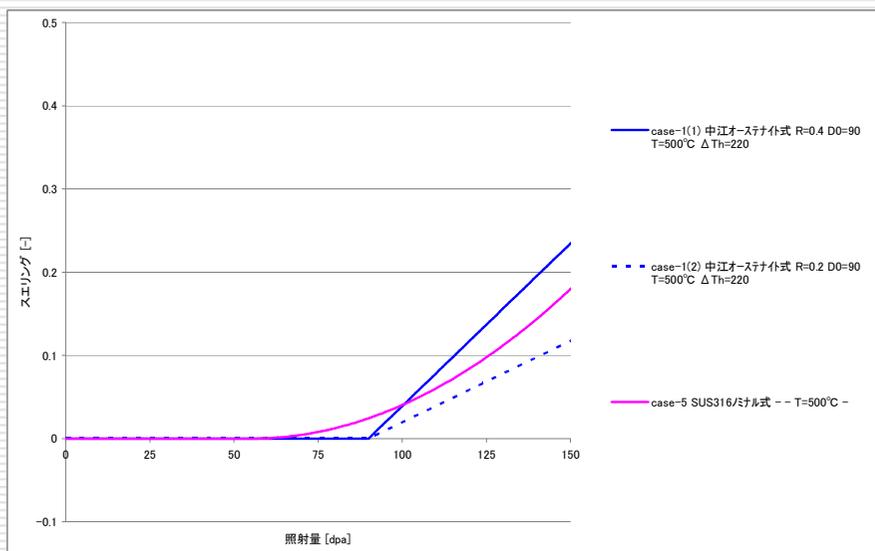
損傷量が10倍異なる。

このことは、被覆管のスエリングによる延性の低下による燃料破損を考慮する必要がある。また、クリープラプチャーが問題となる損傷領域に達することから、FPガス内圧、FCMI応力を正確に推定したクリープ破損評価が必要となる。故に、被覆管のスエリング、照射クリープ、クリープ強度特性を正確に把握する必要がある

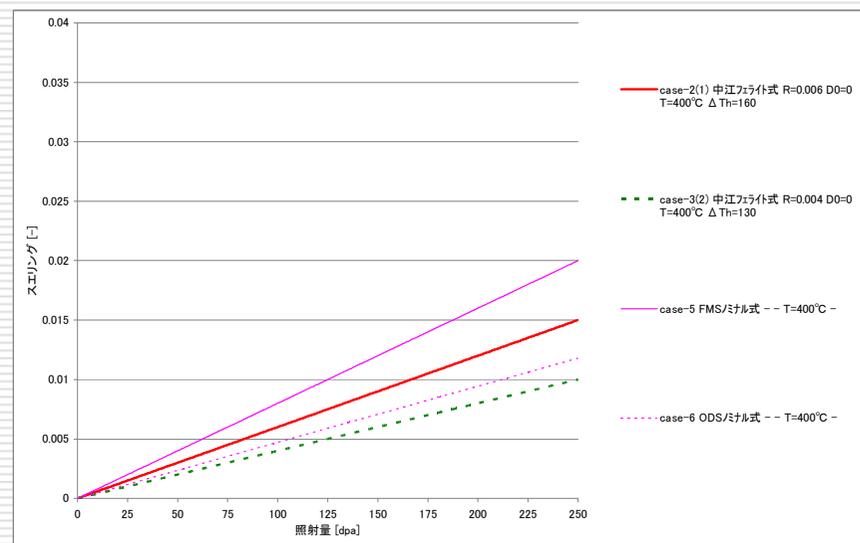
スエリング式

$$S = R \cdot \varphi(D - D_0) \cdot \exp\left\{-\frac{(T - T_{\max})^2}{2 \cdot \sigma_T^2}\right\}$$

材料	R	D_0	T_{\max}	ΔT_h	備考
オーステナイト	0.4	90	480	220	PNC316相当
フェライト	0.006	0	400	160	FMS相当



オーステナイト(500°C)

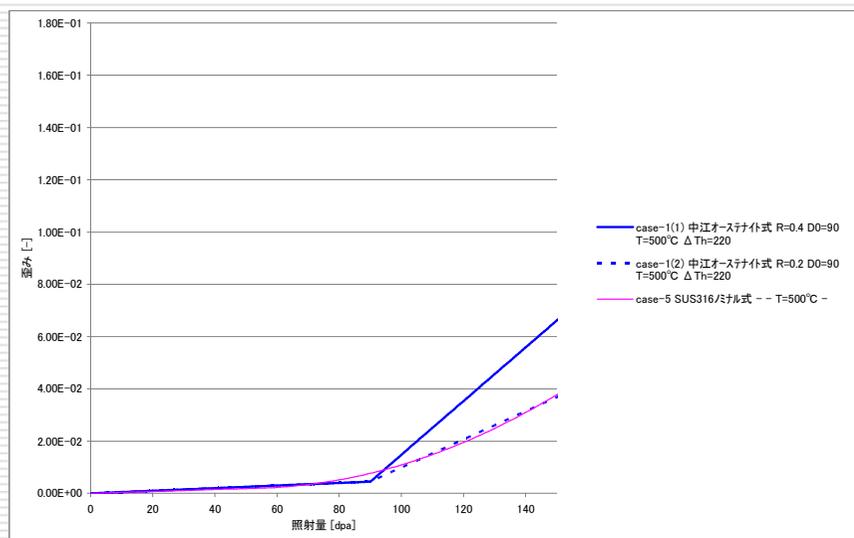


フェライト(400°C)

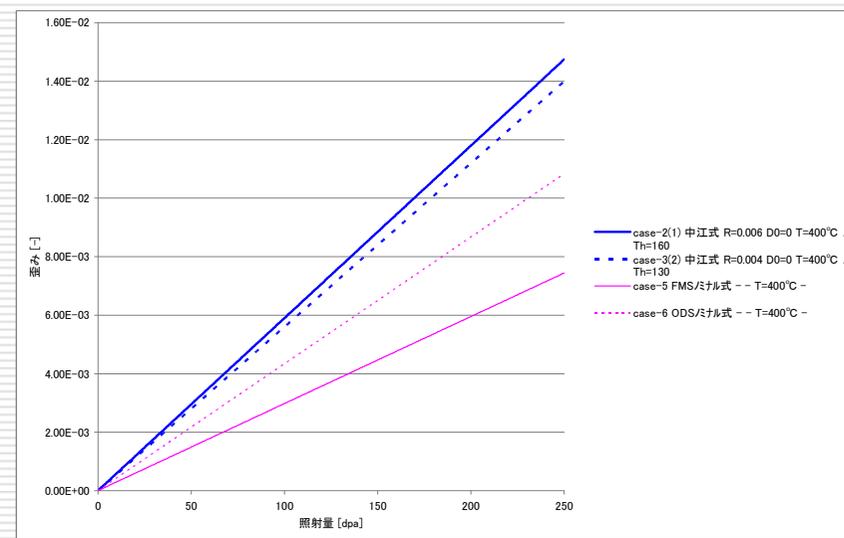
照射クリープ式

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{\sigma} = B_0 + D_0 \dot{S}$$

材料	B_0	D_0	備考
オーステナイト	10^{-6}	0.005	PNC316相当
フェライト	10^{-6}	0.003	FMS相当



オーステナイト(50MPa、500°C)

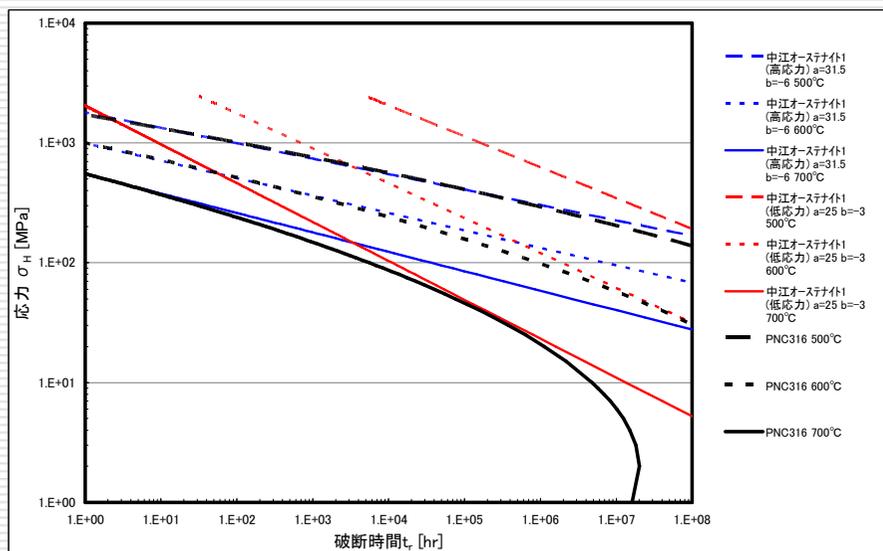


フェライト(50MPa、400°C)

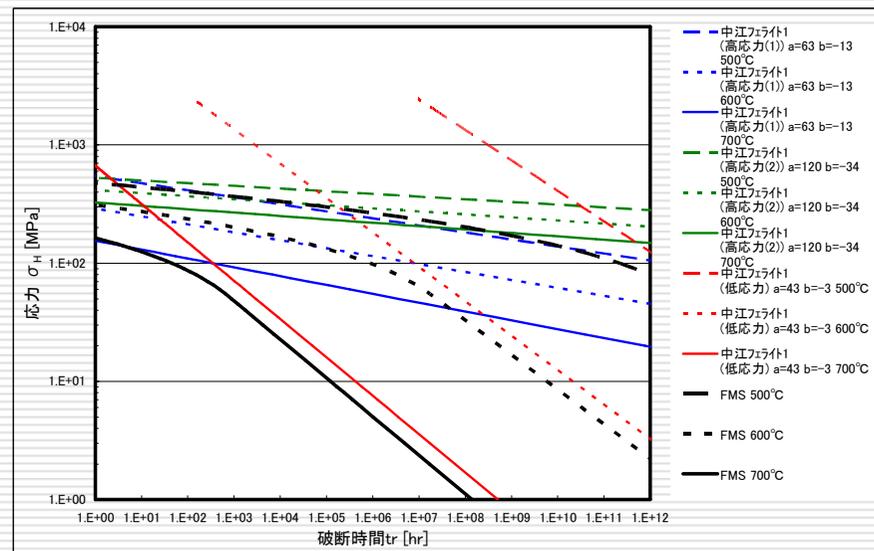
クリープ強度式

$$LMP = T(M_C + \log t_R) \quad LMP/1000 = a + b(\log \sigma_H) + c(\log \sigma_H)^2$$

材料	応力範囲	a	b	c	M_C 材料定数
オーステナイト	低応力(147MPa以下)	25	-3	0	15
	高応力(147MPa以上)	31.5	-6	0	15
フェライト	低応力(100MPa以下)	43	-3	0	35
	高応力(1) (100-518MPa)	63	-13	0	35
	高応力(2) (518MPa以上)	120	-34	0	35



オーステナイト



フェライト