

③ 既往研究で取得された関連材料特性データの現状 ー オーステナイト系ステンレス鋼の超高温材料特性 式の開発 ー

○ 鬼澤高志、下村健太、加藤章一、若井隆純

日本原子力研究開発機構

背景、目的(1/2)

福島第一原子力発電所の事故以降、シビアアクシデント時の構造健全性評価が求められている。



構造材料の超高温までの材料特性が必要



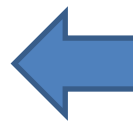
原子力プラントにおけるシビアアクシデント時の構造健全性評価に適用することを目的に、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304、SUS316、316FR鋼) の最高1200°Cまでの材料試験データを取得し、超高温まで適用可能な材料特性式を設定する。

背景、目的(2/2)

シビアアクシデント時の構造健全性評価に必要な主な材料特性・物性値

材料特性式

- ✓ 弾塑性応力-ひずみ関係式
- ✓ クリープ破断関係式
- ✓ クリープひずみ式



本報告

物性値

- ✓ 縦弾性係数
- ✓ 線膨張係数
- ✓ ポアソン比

供試材、試験方法等

供試材:SUS304、SUS316、316FR鋼*

※SUS316に対して低炭素化および窒素添加することで高速炉運転温度域でのクリープ強度を向上した材料。JSME設計・建設規格第II編 高速炉規格(以下、JSME高速炉規格)に新材料として2012年版で規格化されている。

化学成分(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N
SUS304 (JIS G4304)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00 -10.50	18.00 -20.00	—	—	—
SUS316 (JIS G4304)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	—	—
316FR (JSME高速炉規格)	≤0.020	≤1.00	≤2.00	0.020 -0.045	≤0.030	10.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	≤0.05	0.06 -0.12

試験方法

引張試験

JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に準拠。
ただし、ひずみ速度効果を確認するために、ひずみ速度は別途設定。

クリープ試験

JIS Z2271「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」に準拠。

試験片形状(引張試験、クリープ試験共通)

中実丸棒試験片 φ10mm、GL50mm

超高温弾塑性応力-ひずみ関係式の設定

JSME高速炉規格において、SUS304、SUS316および316FR鋼それぞれについて、650°Cまでの弾塑性応力-ひずみ関係式が規定されている。



650°Cを超える超高温の弾塑性応力-ひずみ関係式を設定することとした。

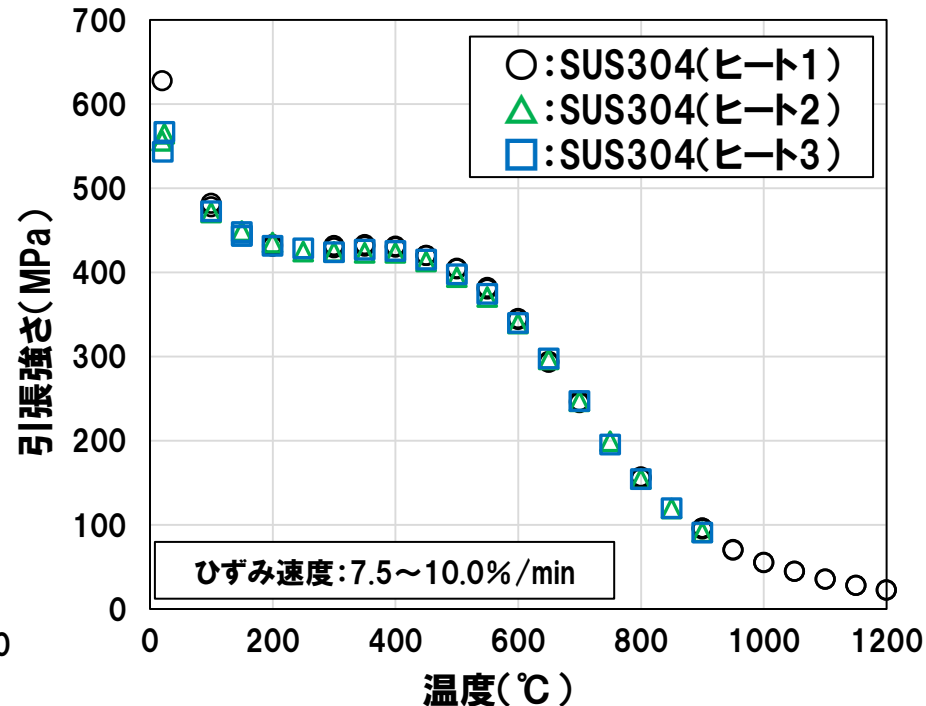
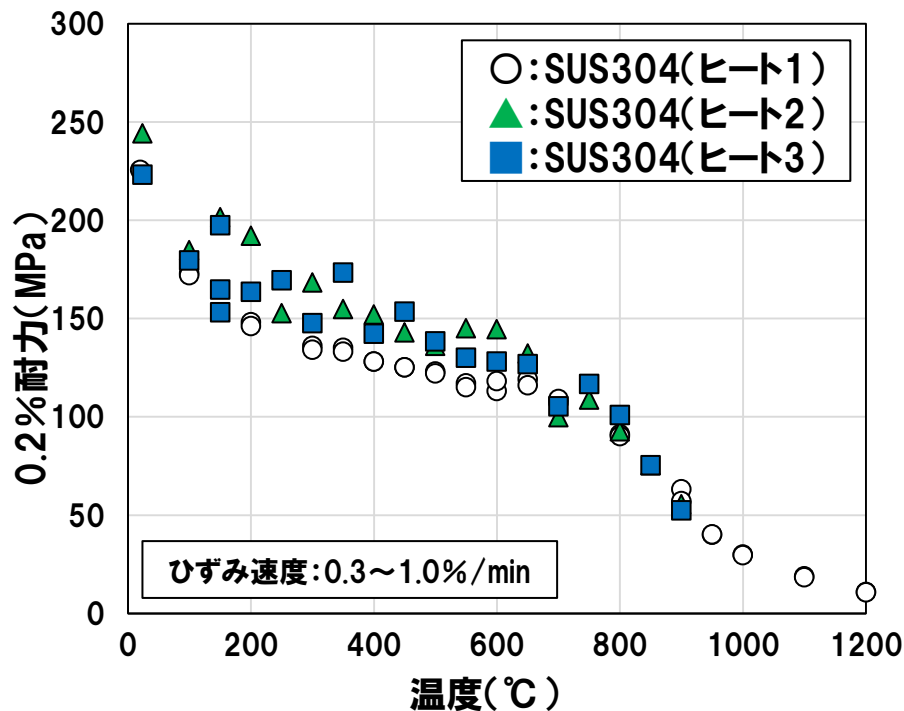
650°Cを超える引張試験データ(応力-ひずみ関係)の報告は、ほとんど無かったことから、新たに試験データを取得した。

JAEA所有の引張試験装置の最高試験温度である1200°Cまでの試験を実施



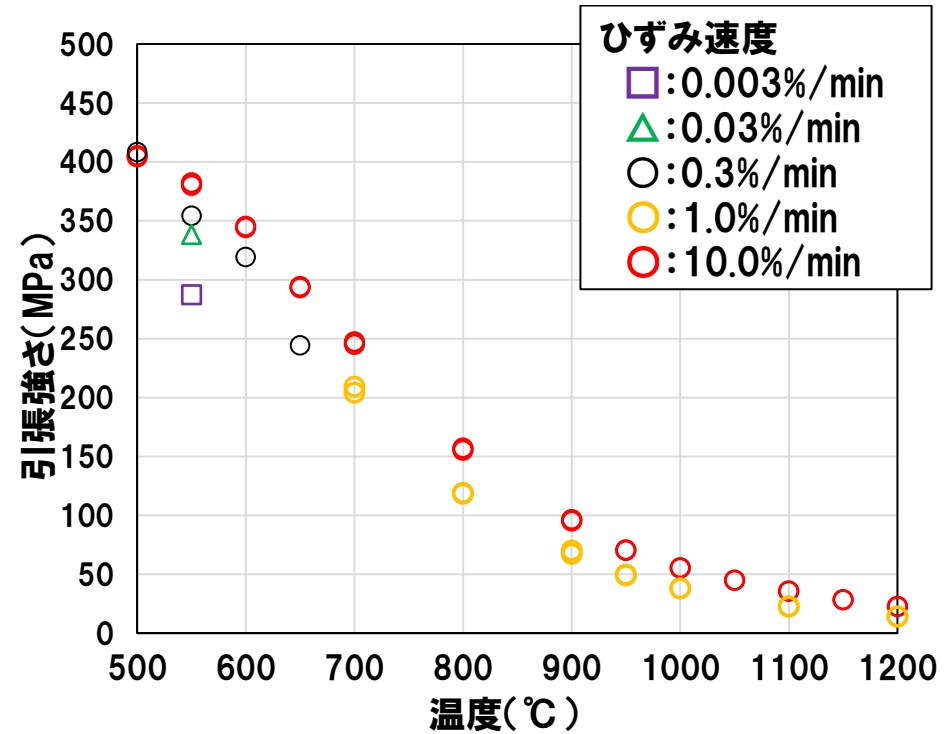
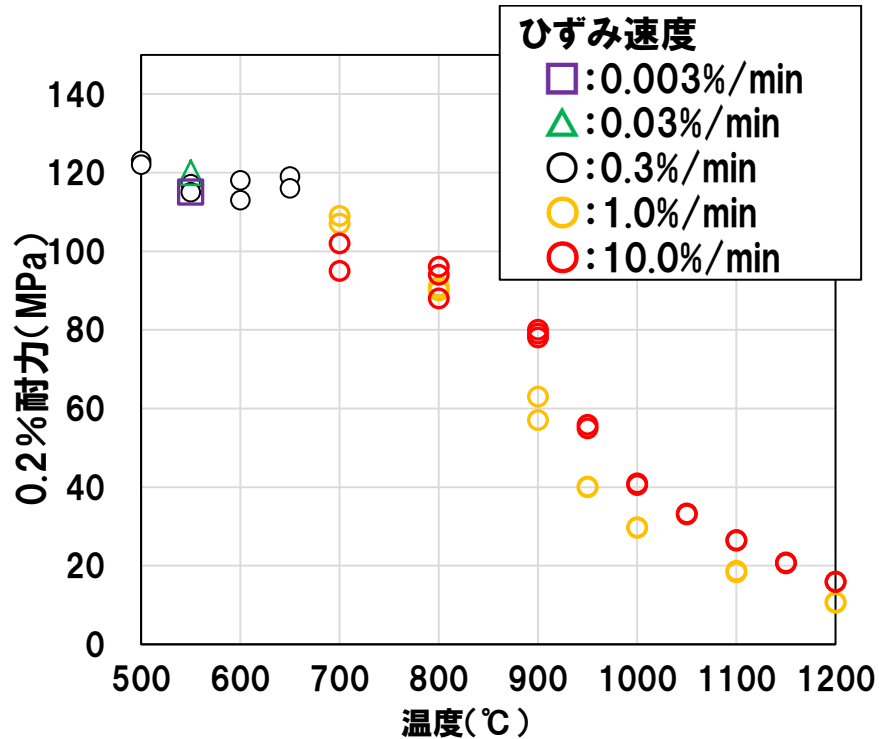
SUS304の引張強度

3ヒートに対して最高1200℃までの引張試験を実施



- 600℃程度から温度上昇に伴う0.2%耐力および引張強さの低下が顕著になる。
- 900℃程度から温度上昇に伴う0.2%耐力および引張強さの低下が緩やかになる。
- ヒート間差は、高温になるほど小さくなる傾向である。

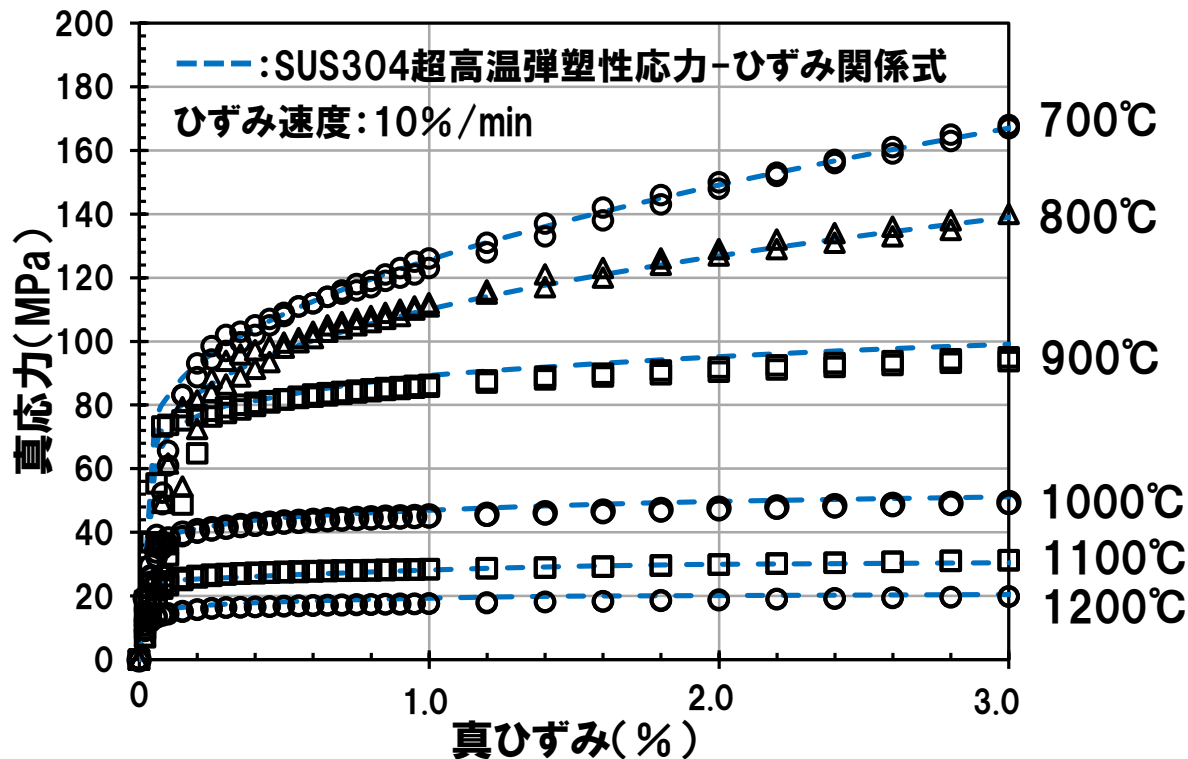
SUS304の引張強度(ひずみ速度の影響)



- 本データからは0.2%耐力は800°C、引張強さは500°Cを超えるとひずみ速度の影響(超高温では主にクリープの効果)が顕著になると評価できる。

超高温弾塑性応力-ひずみ関係式は、ひずみ速度10%/min一定で試験したデータに基づき定式化を実施し、ひずみ速度効果はクリープひずみ式を用いて別途評価する形とした。

SUS304の弾塑性応力-ひずみ関係式

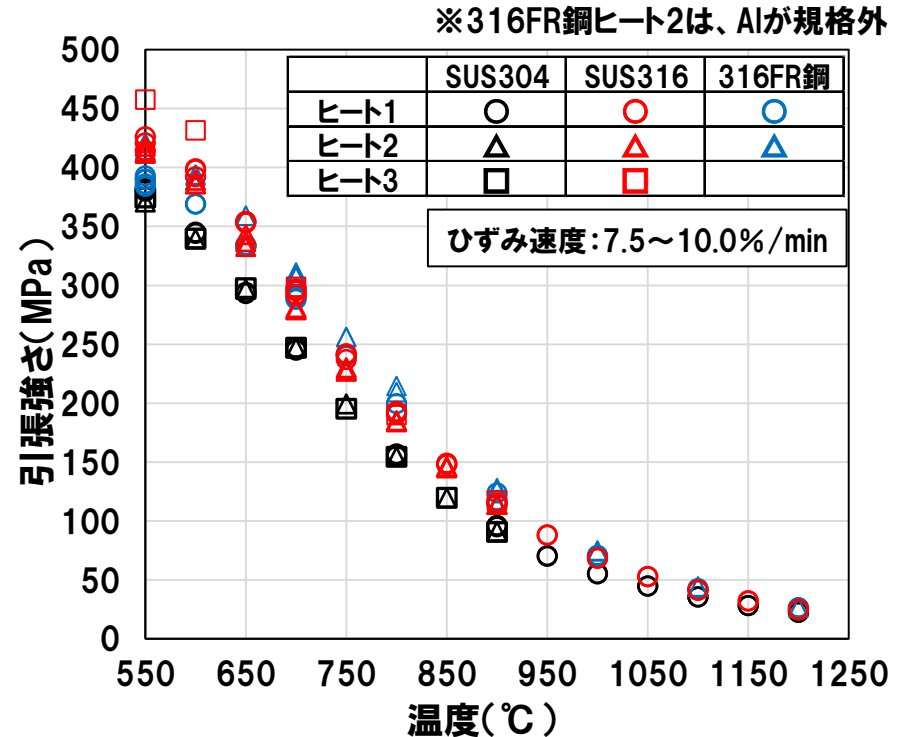
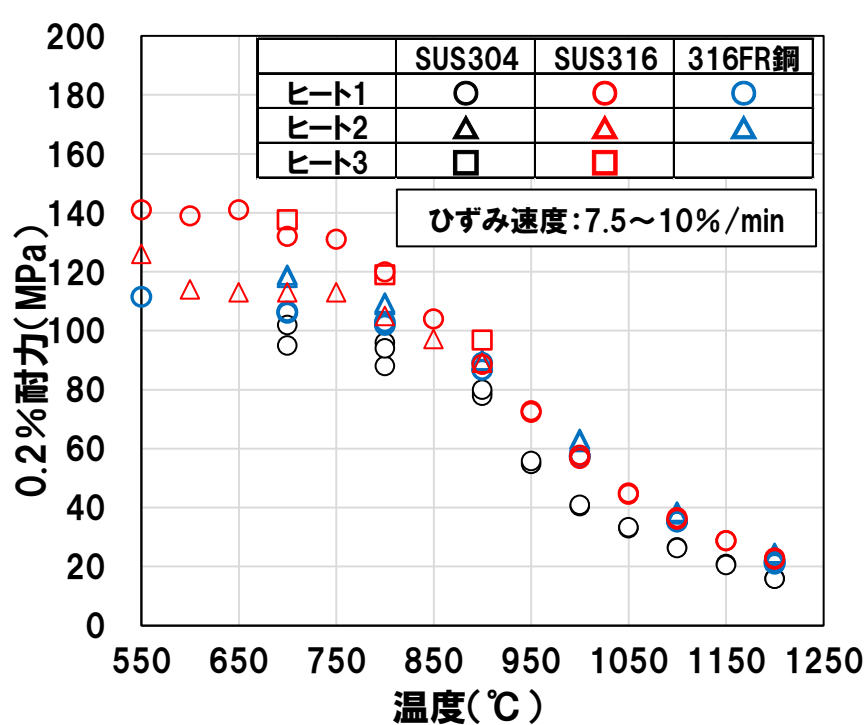


➤ 低ひずみ速度の試験結果も、本弾塑性応力-ひずみ関係式を用いて、比例限のひずみ速度依存性を考慮し、別途整備しているクリープひずみ式を用いることで概ね記述できる。

取得した試験データより650°Cから1200°Cまで適用可能なSUS304用超高温弾塑性応力-ひずみ関係式を開発

- JSME式との連続性を確保(650°Cで同一の値となるように設定した)
- JSME式と同じくLudwikの式を用いて定式化

SUS316および316FR鋼の引張強度



- 高温になるほどヒート間・鋼種間の差が小さくなり、SUS316と316FR鋼は同等と評価できる。
 - 1000℃を超える超高温でも、SUS304とSUS316,316FR鋼で引張強度に差が見られるため、材料特性式(弾塑性応力-ひずみ関係式)は別途設定が必要
- ⇒SUS316,316FR鋼の超高温弾塑性応力-ひずみ関係式は、現在定式化中

超高温クリープ破断関係式の設定

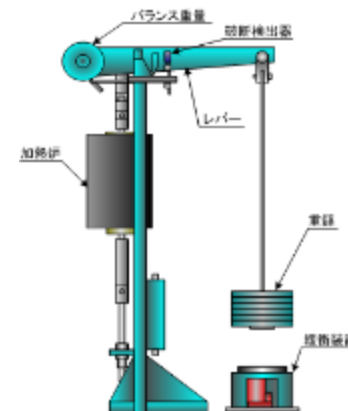
JSME高速炉規格において、SUS304、SUS316および316FR鋼それぞれについて、最高650℃～815℃まで適用可能なクリープ破断関係式が規定されている。



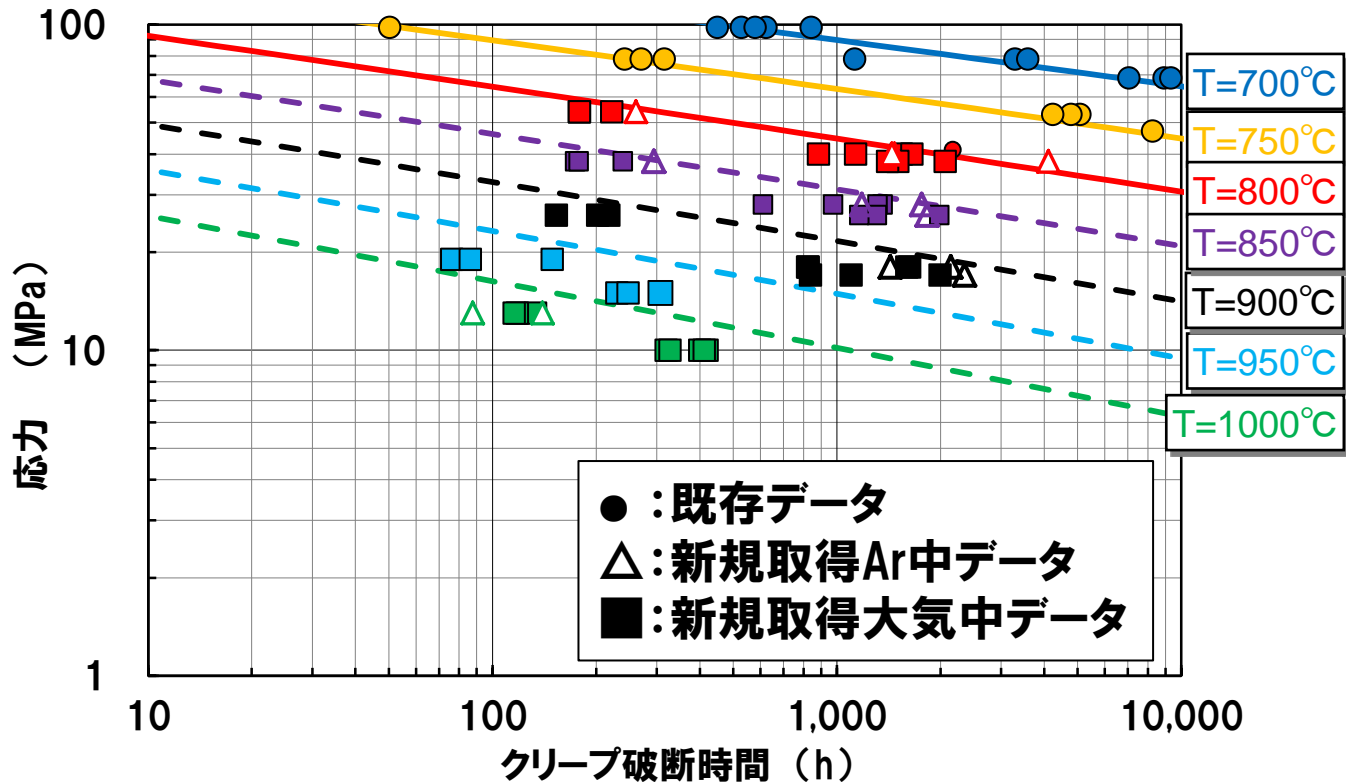
JSME式の適用温度上限を超える超高温域のクリープ破断関係式を設定する。

700℃を超えるクリープ試験データの報告は、ほとんど無かったことから、新たに試験データを取得した。

JAEA所有のクリープ試験装置の最高試験温度である1000℃までの試験を実施



SUS304のクリープ強度

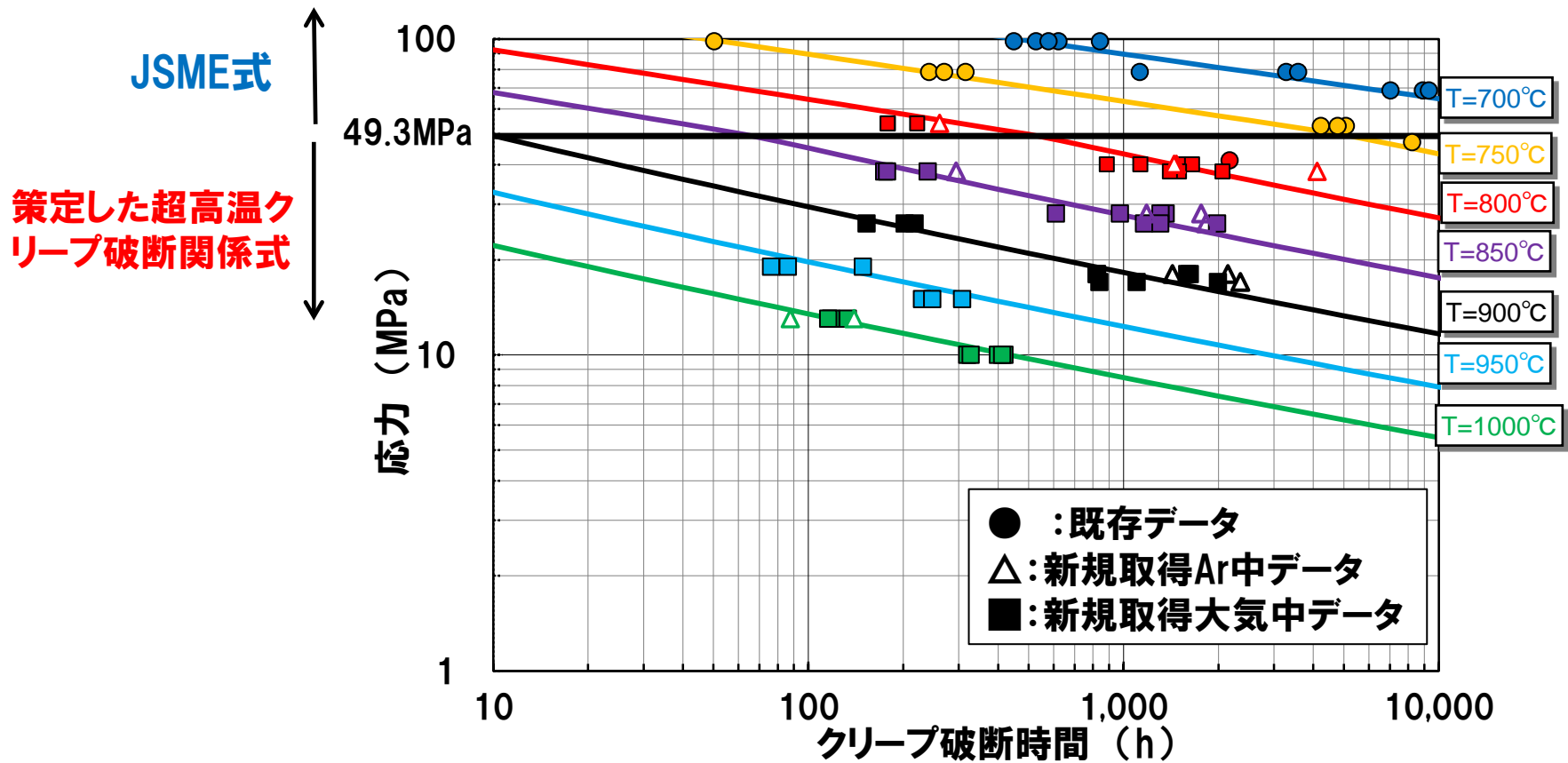


3ヒートに対して最高1000°Cまでのクリープ試験を実施

JSME式の適用温度外への温度外挿を実施

- 酸化の影響を評価するために、Ar中試験も実施したが、大気中試験結果との有意差は確認できなかった。
- **JSME式**(適用温度範囲815°C以下)を、温度外挿して用いることが低温からの連続性などの観点より合理的であったが、**800°Cを超える高温では、データを非保守的に評価することが明らかとなったため、新たに超高温用のクリープ破断関係式を設定することとした。**

SUS304の超高温クリープ破断関係式



取得した試験データより1000°Cまで適用可能なSUS304用クリープ破断関係式を開発

- 温度・時間パラメータ法であるLMP法が1000°Cまで適用可能であることを確認
⇒JSME式と同様にLMP法を採用した。
- JSME式との連続性を考慮し、49.3MPa以上はJSME式を使用する形とした。

SUS304のクリープ破断関係式

破損確率

シビアアクシデント評価は、設計評価と異なり、破損確率に応じた評価ニーズが存在

$$\log_{10} t_R = \frac{A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2}{T + 273.15} - C - ZS$$

	式1(JSME式)	式2
C	17.54301	17.54301
A ₀	31883.53	33054.77
A ₁	-5261.784	-8354.307
A ₂	-425.0012	993.0764
S	0.2432203	0.1437055

T: 温度(°C) 425 ≤ T ≤ 1000、σ: 応力 (MPa) 10 ≤ σ

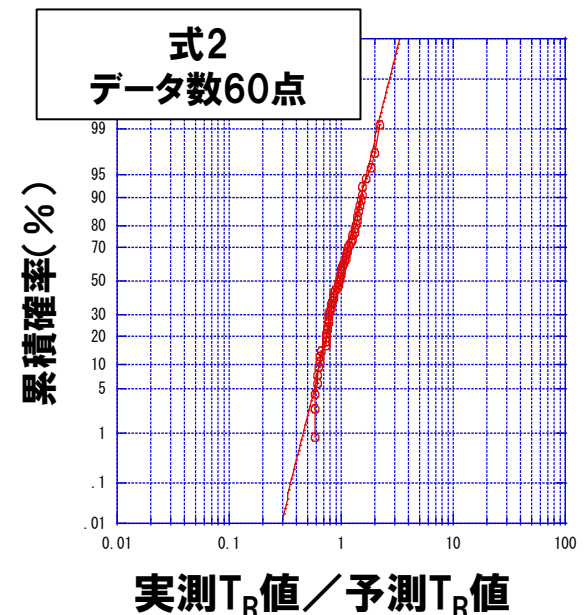
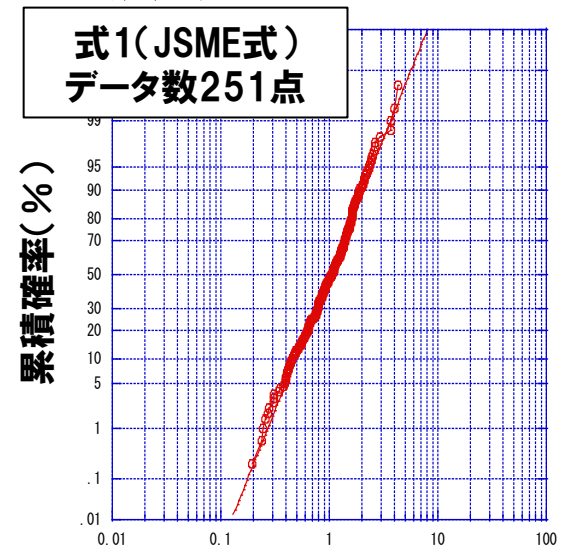
T_R: 破断時間(h)、 S: 対数標準偏差

Z: 破損確率に応じて標準正規分布より設定する値

50%破損確率(平均値)=0

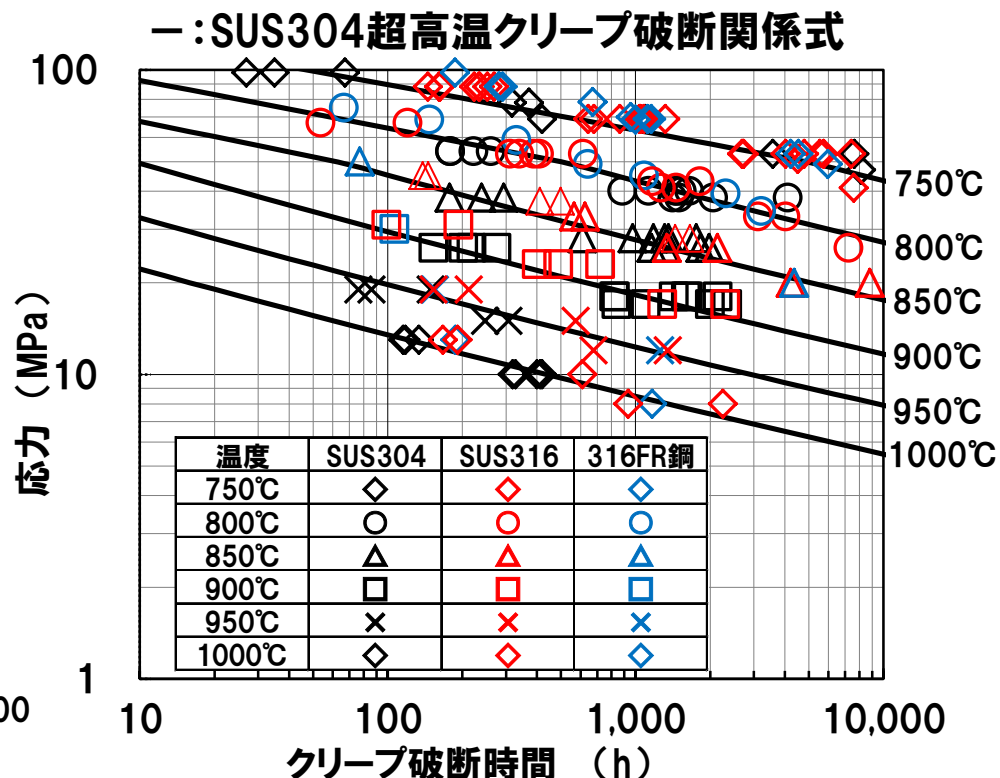
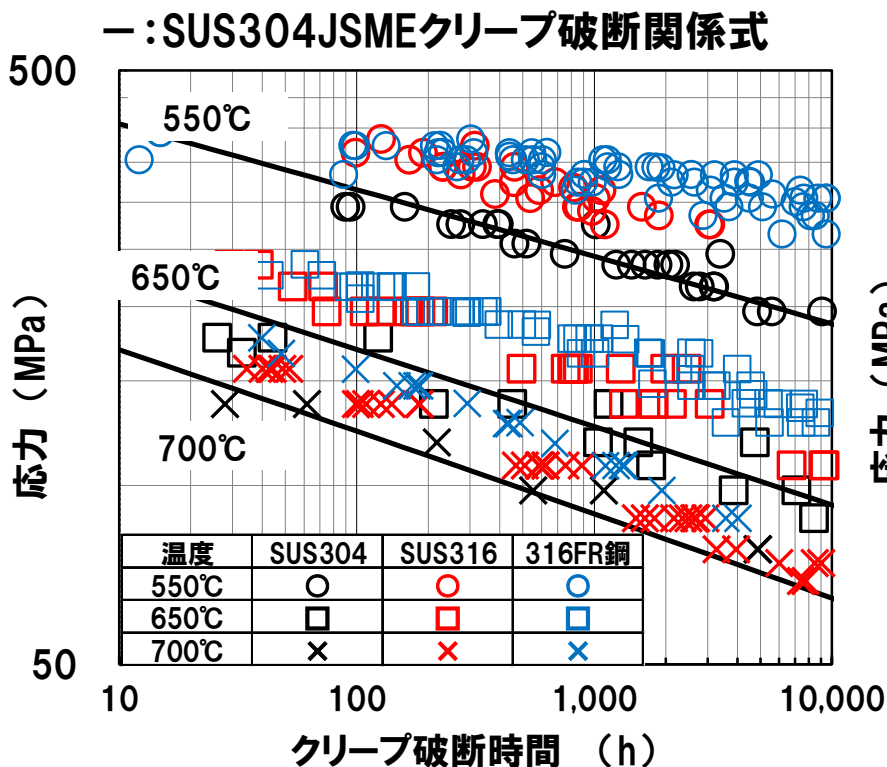
5%破損確率=1.64

1%破損確率=2.33



破損確率に応じたクリープ強度を設定可能

SUS316および316FR鋼のクリープ強度



- 高速炉運転温度域である550°Cでは、3鋼種のクリープ強度は有意な差があるが、高温になるほどクリープ強度の鋼種間差は小さくなる。
- 750°C - 数千時間を超える温度 - 時間では、3鋼種同等のクリープ強度と評価できる。
- SUS304超高温クリープ破断関係式がSUS316、316FR鋼に適用可能である。

まとめ

原子力プラントにおけるシビアアクシデント時の構造健全性評価に適用することを目的に、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304、SUS316、316FR鋼)の最高1200℃までの材料試験データを取得し、超高温まで適用可能な材料特性式を設定した。

- ✓ 1200℃まで適用可能なSUS304超高温弾塑性応力-ひずみ関係式を設定した。
- ✓ SUS316、316FR鋼超高温弾塑性応力-ひずみ関係式は今後設定予定。
- ✓ 1000℃まで適用可能なSUS304超高温クリープ破断関係式を設定した。
- ✓ SUS316、316FR鋼のクリープ強度は、750℃-数千時間を超える温度-時間ではSUS304と同等となるため、SUS304の超高温クリープ破断関係式が適用可能である。

課題と展望

課題

- ✓ 原子力プラントで使用されている材料は他にもある
高速炉: 2.25Cr-1Mo鋼、改良9Cr-1Mo鋼
軽水炉: 低合金鋼 (ASTM A533B) 等
- ✓ どこまで高温の材料特性が必要か？
 - 高温になるほど、酸化や試験装置の耐久性など材料試験の難しさがある。
 - 材料の変態点や熱処理温度を超える温度では急激な材料特性の変化が生じることから、材料特性式の設定が難しい。

展望

- ✓ ステンレス鋼の引張強度およびクリープ強度は、高温になるほど鋼種間差が小さくなり、特にクリープ強度では同一と評価できることを確認した。
⇒他のステンレス鋼についても、広く適用できる可能性がある。
- ✓ ステンレス鋼以外でも、本試験結果より超高温では材料の強化機構が小さくなるのが推定されるため、ある程度の鋼種に対して材料特性式を整備することで、多くの材料をカバーできると考えられる。