Tetsu-to-Hagané
Journal of the Iron and Steel Institute of Japan

Tetsu-to-Hagané Vol. 112 (2026), No. 14, pp. 778-784
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2026-036

Technical Report

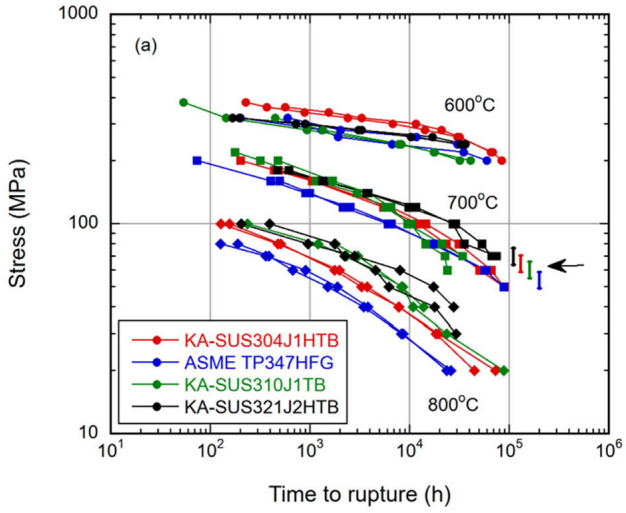
Long-term Creep Strength Properties of High Strength Austenitic Heat-resistant Steels

Kota SAWADA[1)]*, *Yasushi* TANIUCHI[2)], *Takehiro* NOJIMA[2)], *Kaoru* SEKIDO[2)], *Tomotaka* HATAKEYAMA[1)] and *Kazuhiro* KIMURA[1)]

1) Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science
2) Research Network and Facility Services Division, National Institute for Materials Science

Abstract: The tensile properties and long-term creep strength of KA-SUS321J2HTB were compared with those of KA-SUS304J1HTB, KA-SUS310J1TB, and ASME TP347HFG steels. The 0.2% proof stress and tensile strength of KA-SUS321J2HTB were lower than or equal to those of the other three steels at high temperatures. The tensile ductility of KA-SUS321J2HTB was almost the same as that of the other three steels up to 650°C. The reduction of area in the tensile test decreased at 700 to 800°C for KA-SUS321J2HTB. Creep strength degradation was clearly observed in the long-term for KA-SUS321J2HTB, similar to KA-SUS304J1HTB and KA-SUS310J1TB. However, the creep strength of KA-SUS321J2HTB was higher than those of the other three steels at 650 to 750°C. The same tendency was recognized in the relationship between stress and minimum creep rate. The creep rupture ductility of KA-SUS321J2HTB gradually decreased with increasing time to rupture, as observed for the other three steels.

Keywords: high strength austenitic heat-resistant steels; tensile properties; long-term creep rupture strength; creep rupture ductility.



Received July 23, 2026; Accepted September 8, 2026; Advance online published September 15, 2026; Published November 1, 2026

* Corresponding author. E-mail: sawada.kota@nims.go.jp, Address: National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba Ibaraki 305-0047

© 2026 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

技術報告

鉄と鋼 Tetsu-to-Hagané Vol. 112 (2026), No. 14, pp. 778-784
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2026-036

高強度オーステナイト耐熱鋼の長時間クリープ強度特性

澤田 浩太[1)*]・谷内 泰志[2)]・野島 健大[2)]・関戸 薫子[2)]・畠山 友孝[1)]・木村 一弘[1)]

Long-term Creep Strength Properties of High Strength Austenitic Heat-resistant Steels

Kota Sawada, *Yasushi* Taniuchi, *Takehiro* Nojima, *Kaoru* Sekido, *Tomotaka* Hatakeyama and *Kazuhiro* Kimura

1. 緒言

超々臨界圧火力発電（USC）プラントのボイラチューブや主蒸気配管などで広く使用されているASME Gr.91鋼など，高Crフェライト耐熱鋼では，その長時間クリープ特性，材質劣化，ヒート間差，さらには同鋼の溶接継手クリープ強度特性について多数の研究が行われてきた[1–3)]。その結果，ASME Gr.91鋼では，化学成分や許容応力の見直しが提案されている[4)]。一方，USCプラントの加熱器管や再熱器管として，高強度オーステナイト耐熱鋼が広く使用されている。同鋼は国内において精力的に開発が行われ，多くの材種が実用化されている[5)]。しかし，同鋼においても，高Crフェライト耐熱鋼と同様に，長時間クリープ強度の低下が生じるため[6)]，応力ー破断時間線図の領域を分割した解析方法などが提案されている[7,8)]。また，高強度オーステナイト耐熱鋼のクリープによる材質劣化に関する研究も報告されている[9–11)]。

物質・材料研究機構（NIMS）では，火力発電プラント，原子力発電プラント，石油化学プラントなどで使用される国産耐熱金属材料の規格材を対象に，10万時間クリープ強度を取得し，クリープデータシートとして公表してきた[12)]。高強度オーステナイト耐熱鋼についても長時間クリープ特性評価を行っており，最近，火SUS321J2HTB（18Cr–10Ni–3Cu–Ti–Nb）の長時間クリープデータを取得した。そこで，既にクリープデータシートを発刊済の高強度オーステナイト耐熱鋼である火SUS304J1HTB（18Cr–9Ni–3Cu–Nb–N）[13)]，火SUS310J1TB（25Cr–20Ni–Nb–N）[14)]，ASME TP347HFG（18Cr–10Ni–Nb）[15)]と比較することで，火SUS321J2HTBの特徴を抽出することを目的として，高温引張特性，クリープ強度特性，クリープ破断延性の比較検討を行った。

2. 実験方法

供試鋼は火SUS304J1HTB（2ヒート），火SUS310J1TB（2ヒート），ASME TP347HFG（2ヒート），火SUS321J2HTB（2ヒート）である。火SUS321J2HTBの溶解方法，インゴットサイズ，製品寸法，熱処理条件，オーステナイト粒度番号，ロックウェル硬さ，介在物量についてTable 1に示す。オーステナイト粒度番号はJIS G 0551-2020[16)]に基づいて算出し

Table 1. Details of 18Cr–10Ni–3Cu–Ti–Nb stainless steel tubes, AFA and AFB[1)].

Heat	Type of melting[2)]	Size of ingot (t)	Deoxidation process	Product form	Dimensions[3)] (mm)	Processing and thermal history[4)]	Austenite grain size number[5)]	Rockwell harndess (HRB)	Non-metallic inclusion[6)] (%)
AFA	BEA	2600	Al killed	Tube	50.8 OD 9.0 WT 4000 L	Hote extruded and cold drawn 1160°C WQ	3.8 (64 2%) 6.3 (35 8%)	77	dA = 0.00 dB = 0.43 dC = 0.53
AFB					57.0 OD 13.4 WT 1000 L		3.2	70	dA = 0.02 dB = 0.43 dC = 0.63

1) The tubes were sampled in 2014. The details other than hardness, non-metallic inclusion, pearlite area and grain size were reported by the steel manufacturer.
2) BEA : Basic electric furnace
3) OD : outside diameter, WT : wall thickness, L : length
4) WQ : water quenching
5) JIS G 0551: 2020, Steels-Micrographic determination of the apparent grain size.
6) JIS G 0555: 2020, Microscopic testing method for the non-metallic inclusions in steel.

2026年7月23日受付 2026年9月8日受理 2026年9月15日早期公開 2026年11月1日発行(Received July 23, 2026; Accepted September 8, 2026; Advance online published September 15, 2026; Published November 1, 2026)

1) 国立研究開発法人物質・材料研究機構構造材料研究センター（Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science）
2) 国立研究開発法人物質・材料研究機構技術開発・共用部門（Research Network and Facility Services Division, National Institute for Materials Science）
＊ Corresponding author. E-mail: sawada.kota@nims.go.jp, Address: National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba Ibaraki 305-0047

© 2026 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja).

た。さらに表中のdA，dB，dCはJIS G 0555-2020[17]において規定されるグループA，B，Cの介在物の量である。また，Table 2に，化学成分を示すが，いずれのヒートも規格の成分範囲内である。規格に規定されていない化学成分は，参考として，NIMSにて別途分析した結果である。なお，他の3鋼種に関する類似の情報は，クリープデータシートにて報告済である[13–15]。

引張およびクリープ試験片の平行部直径は6 mmまたは10 mm，標点間距離は30 mmまたは50 mmである。試験片の長手方向はボイラチューブの長手方向に平行になるように採取した。引張試験は，室温～800℃で，JIS G 0567[18]に準拠して実施した。公称ひずみ速度は，1%耐力までは0.3%/min，以降は7.5%/minである。なお，室温の引張試験規格JIS Z 2241[19]と高温引張試験規格であるJIS G 0567のひずみ速度の規定は異なるので，強度特性を直接比較することが困難なため，本実験では，室温の引張試験もJIS G 0567に準拠して実施した。クリープ試験は，JIS Z 2271[20]に準拠して実施した。クリープ試験の温度範囲は，600～800℃である。引張試験，クリープ試験の100℃から800℃の温度は±3℃以内に制御した。

3. 結果および考察

3・1　引張特性

Fig. 1に，4鋼種の0.2%耐力，引張強さと温度の関係を示す。火SUS321J2HTBの0.2%耐力は，他の3鋼種に比べて大きなヒート間差が確認されたものの，同鋼の強度の高いヒートの0.2%耐力は，他の3鋼種と同程度であった。室温においても同鋼の0.2%耐力にヒート間差が認められており，それが高温でも維持されていると思われる。

引張強さには，いずれの温度においても鋼種間差が確認され，引張強さは，

火SUS310J1TB＞火SUS304J1HTB＞ASME TP347HFG＞火SUS321J2HTBの順であった。なお，700℃～800℃では，引張強さの鋼種間差が小さくなるが，火SUS310J1TBは高い強度を維持していた。Fig. 2に4鋼種の引張試験による破断伸びおよび破断絞りと温度の関係を示す。いずれの鋼種も650℃程度までは，破断伸びおよび破断絞りが温度の上昇に伴い低下する傾向にある。火SUS304J1HTBおよびASME TP347HFGは，650℃を超えると，破断伸びおよび破断絞りが温度の増加に伴い増加する。一方，火SUS310J1TBは，650℃を超えると，急激に破断伸びおよび破断絞りともに低下する。

Table 2.　Chemical composition (product analysis) of 18Cr–10Ni–3Cu–Ti–Nb stainless steel tubes.

Heat	Chemical composition (mass%)[1]														
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo*	Ti	V*	Nb	N*	Cu	B	Co*
Requirement[2]	0.07 –0.14	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.010	9.00 –12.00	17.50 –19.50		0.10 –0.25		0.10 –0.45		2.50 –3.50	0.0010 –0.0040	
AFA	0.08				0.001	10.05	17.74	0.18	0.17	0.05	0.20	0.011	2.75	0.0019	0.10
AFB	0.10*	0.28*	1.40*	0.026*	0.0007*	10.4*	18.3*	0.25	0.17*	0.04	0.28*	0.014	2.78*	0.0017*	0.07

1) The chemical composition given above was reported by the steel manufacturer except for the elements marked with asterisk, for which the analysis was carried out at NIMS.
2) KA-SUS321J2HTB, The material specification in the Technical Regulation of Equipment for Thermal Power Plant, (2007).

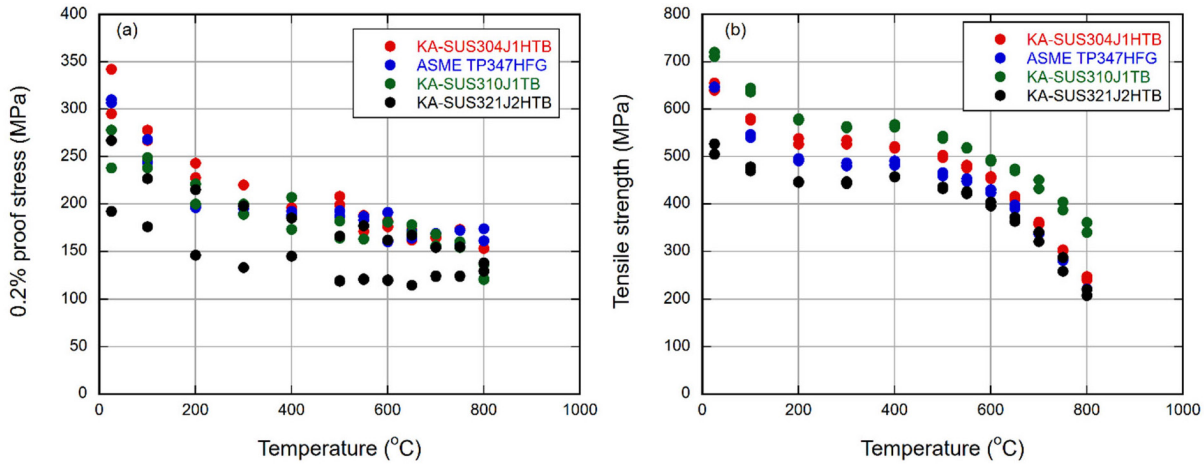


Fig. 1.　Relationship between tensile property and temperature for four steels. (a) 0.2% proof stress, (b) tensile strength. (Online version in color.)

火SUS321J2HTBの破断伸びは650℃を超えてもあまり変化しないものの，破断絞りは，650℃を超えると低下する傾向があるが，火SUS310J1TBよりは高い値を示した。火SUS304J1HTBおよびASME TP347HFGの結晶粒度番号は8.8～8.9[13,15]と細粒であるのに対して，火SUS310J1TB[14]および火SUS321J2HTBは3.2～6.3と粗粒であるため，高温延性が低下した可能性が考えられる。

3・2　クリープ強度特性

Fig. 3に，600～800℃における4鋼種の応力ー破断時間線図を示す。今回新規で取得した火SUS321J2HTBのクリープ破断データは，各温度で10,000時間以上であり，最長で約74,596時間であった。いずれの鋼種においても，高温・長時間におけるクリープ破断寿命は，1,000時間程度までのデータトレンドの外挿から比べて短寿命に位置している。特に，火SUS310J1TBや火SUS321J2HTBは，その傾向が他の2鋼種に比べて顕著であり，いわゆる腰折れが生じている。両鋼のクリープ破断データの回帰線を引く際には，材質劣化や破壊機構の遷移に対応した領域分割[7,8]などの工夫が必要になると思われる。650℃以上では，数万時間域における火SUS321J2HTBのクリープ破断強度は，他の3鋼種より高い。しかし，同鋼の長時間域での腰折れが顕著なため，例えば10万時間域においては他鋼種に対する強度の優位性は小さくなる可能性がある。一方，ASME TP347HFGは，短時間域でのクリープ強度は他の鋼種に比べて低いが，長時間域での腰折れは見られず，安定したクリープ強度特性を示している。しかし，800℃では同鋼のクリープ破断強度は，他の3鋼種より明らかに低い。Fig. 4に，4鋼種のLarson-Millerパラメータ（LMP）と応力の関係を示す。2種類のLaron-Miller定数Cを用いており，Fig. 4(a)では，一般的なC＝20による整理を行った。一方，Fig. 4(b)では，高LMP領域のばらつきが小さくなるC＝15による整理を行った。いずれの図面においても，高LMP領域，即ち，高温・長時間領域では，火SUS321J2HTBのクリープ強度は他の3鋼種より高いことが分かる。

クリープ温度領域の許容応力の策定では，クリープ破断データについては下記2つの指標が使用される[21,22]。

(1) 当該温度において100,000時間でクリープ破断する応力の最小値の0.8倍

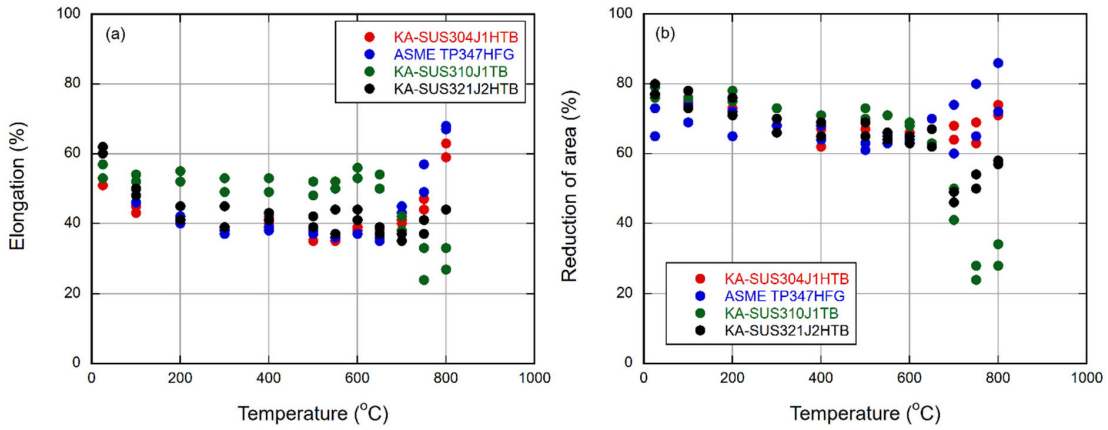


Fig. 2. Relationship between tensile ductility and temperature for four steels. (a) Elongation, (b) Reduction of area. (Online version in color.)

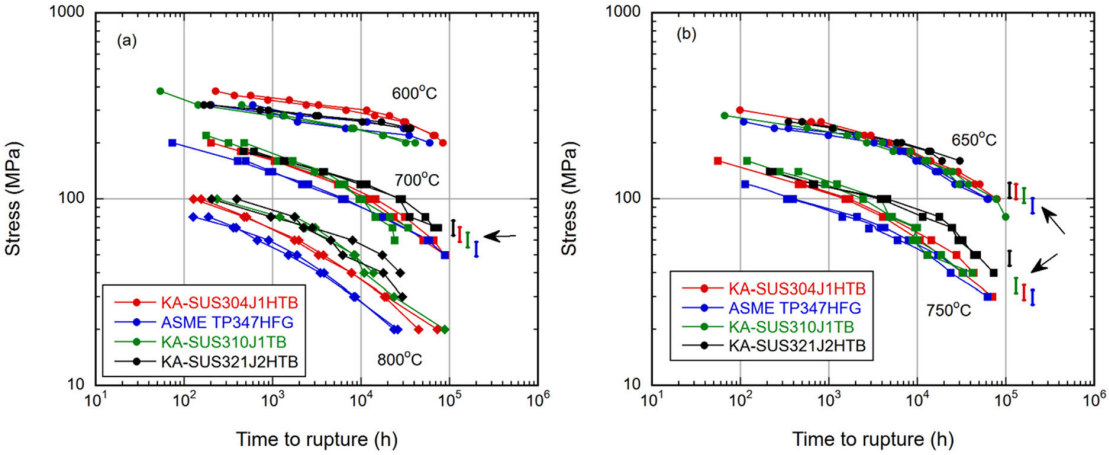


Fig. 3. Stress versus time to rupture curve for four steels. (a) 600, 700, 800°C, (b) 650, 750°C. Arrows indicate average strength and minimum strength estimated from allowable stress. (Online version in color.)

(2) 当該温度において100,000時間でクリープ破断する応力の平均値の0.67倍

4鋼種の許容応力は既に策定されているので[23,24]，それらの許容応力から上記 (1) および (2) により100,000時間でクリープ破断する応力の最小値と平均値を650～750℃で逆算した結果をFig. 3に示す。650℃では，火SUS310J1TBのクリープ破断データは，最小値を下回っていることが分かる。700℃および750℃では，長時間データのトレンドが10万時間域まで継続されると仮定すると，火SUS304J1HTB，火SUS310J1TB，火SUS321J2HTBともに最小値を下回る可能性が高い。一方，ASME TP347HFGは最小値と同程度あるいは若干下回る可能性がある。このため，上記3鋼種は，多数ヒートの長時間クリープ破断データの収集を継続することにより，今後注意深くデータの傾向を注視する必要があると思われる。

Fig. 5に，600～800℃における最小クリープ速度の応力依存性を示す。600℃では，同一応力における最小クリープ速度は，鋼種により大きな違いはないが，650℃および

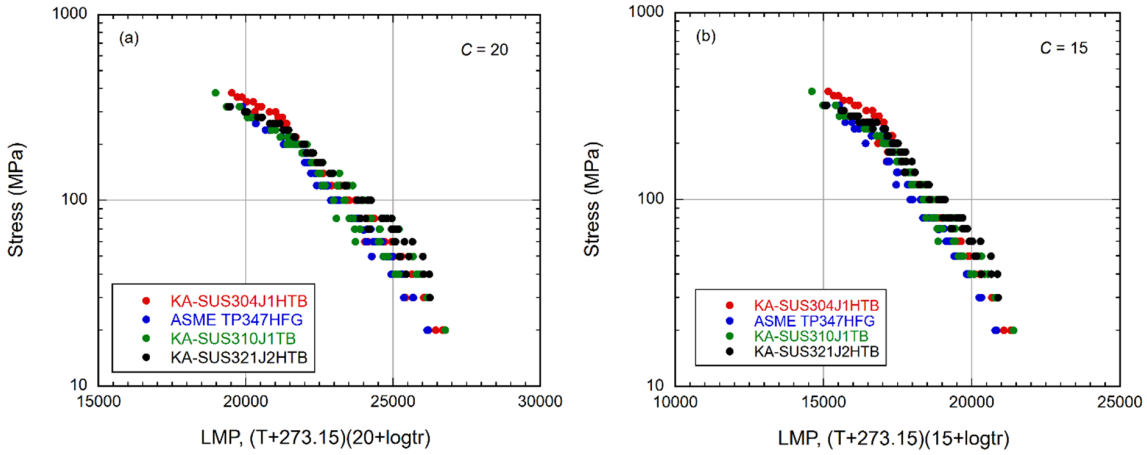


Fig. 4. Relationship between LMP and stress for four steels. (a) $C = 20$, (b) $C = 15$. (Online version in color.)

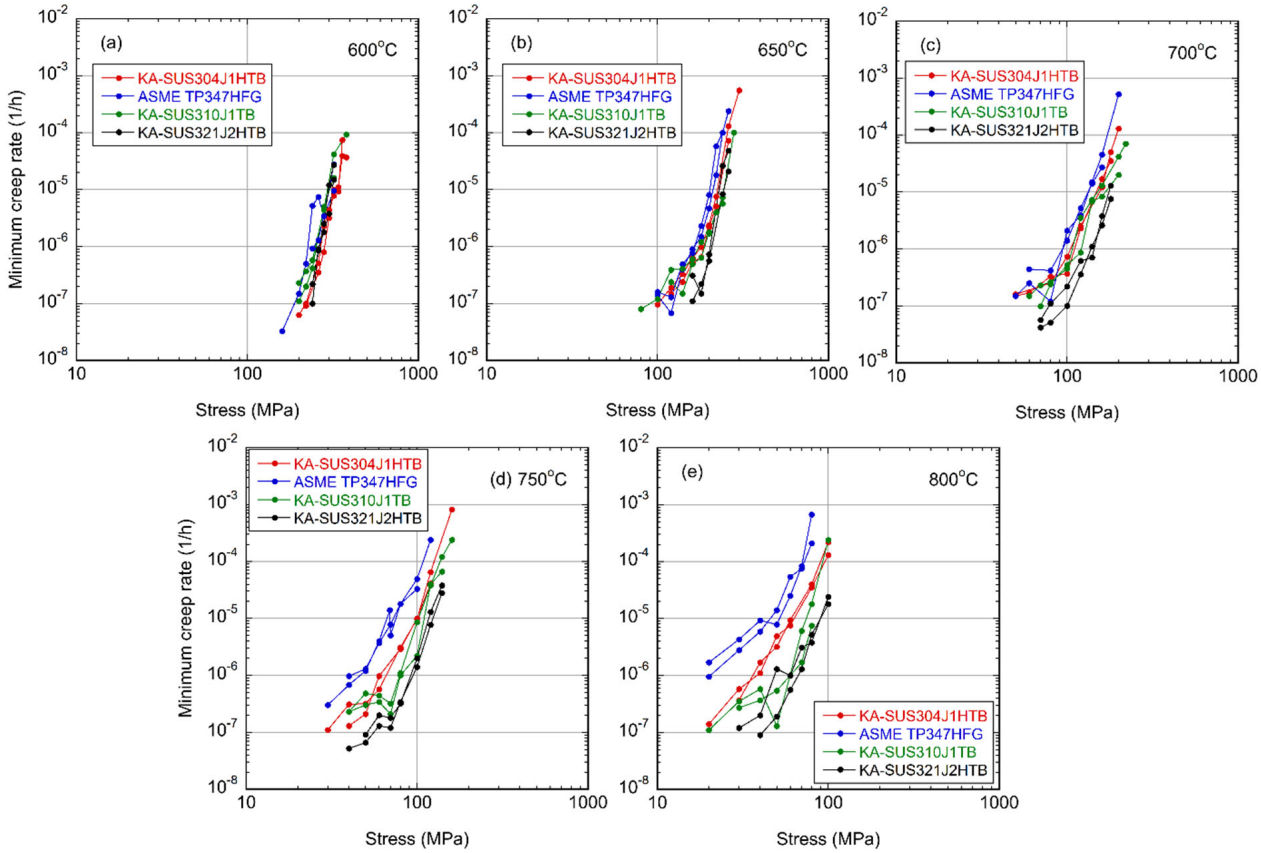


Fig. 5. Stress dependence of minimum creep rate for four steels. (a) 600°C, (b) 650°C, (c) 700°C, (d) 750°C, (e) 800°C. (Online version in color.)

700℃の低応力域では，火SUS321J2HTBの最小クリープ速度は他鋼種より小さい。750℃では，鋼種間の差が広がり，火SUS321J2HTBのクリープ速度は最も小さい。しかし，800℃では，火SUS321J2HTBと火SUS310J1TBの最小クリープ速度は同程度になる。つまり，650℃～750℃では，火SUS321J2HTBのクリープ変形抵抗は他の3鋼種に比べて大きいと言える。このことはFig. 3の応力－破断時間線図における傾向とも一致している。Fig. 6に4鋼種のMonkman-Grantの関係を示す。いずれの鋼種も最小クリープ速度の対数とクリープ破断時間の対数は概ね直線関係になっているが，実線で示す近似線を比較すると，火SUS321J2HTBは，火SUS310J1TBと類似の傾向にあることが分かる。

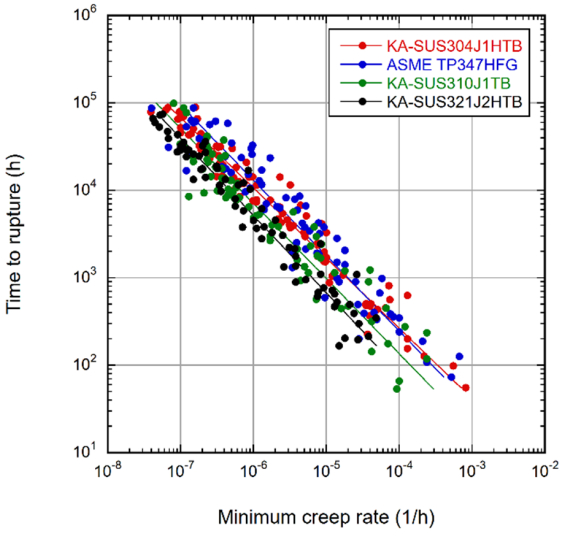


Fig. 6. Relationship between minimum creep rate and time to rupture. (Online version in color.)

3・3　クリープ破断延性

Fig. 7に600～800℃におけるクリープ破断伸びと破断時間の関係を示す。600～800℃では，いずれの鋼種においてもクリープ破断伸びは破断時間の増加に伴い低下する。火SUS304J1HTBおよびASME TP347HFGのクリープ破断伸びは，短時間域では他の2鋼種より高いが，長時間域ではその差は極めて小さくなる。しかし，ASME TP347HFGのクリープ破断伸びは，長時間域における低下の程度は比較的小さい。Fig. 3の700℃や750℃では，火SUS321J2HTBのクリープ破断強度は，他の3鋼種より高いが，火SUS310J1TBのクリープ破断強度は低い。しかし，Fig. 7に示すとおり，両者のクリープ破断伸びは極めて小さくなっており，クリープ破断強度と破断延性は必ずしもトレードオフの関係にはなっていない。Fig. 8にクリープ破断絞りと破断時間の関係を示すが，基本的にはFig. 7に示した破断伸びと同様の傾向であった。Fig. 3に示したとおり，火SUS310J1TBおよび火SUS321J2HTBのクリープ破断強度の腰折れは，他の2鋼種より顕著であるが，両鋼種ともにクリープ破断延性が極めて低くなっているため，腰折れと何らかの関係がある可能性がある。例えば，火SUS304J1HTBでは，時効あるいはクリープ中にσ相が析出すると，粒界上のボイド生成による破壊から，σ相と母相との界面でき裂が生成することによる破壊へ機構が変化する[25]。クリープ破断強度の腰折れのメカニズムを明らかにするためには，火SUS310J1TBや火SUS321J2HTBにおいても同様の検討が必要になると考えられる。Fig. 9に，

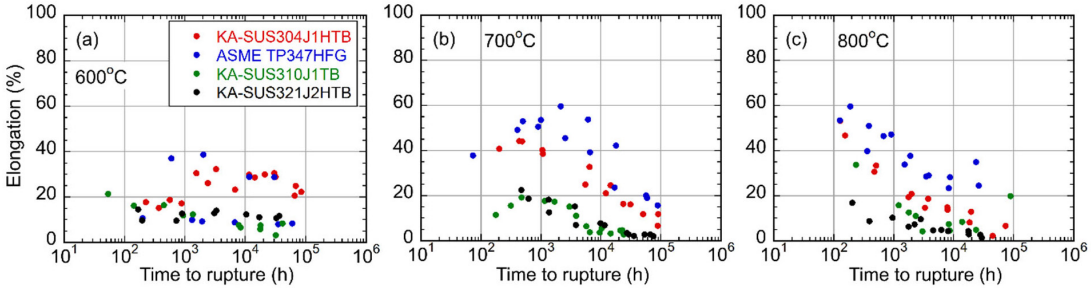


Fig. 7. Relationship between time to rupture and elongation for four steels. (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C. (Online version in color.)

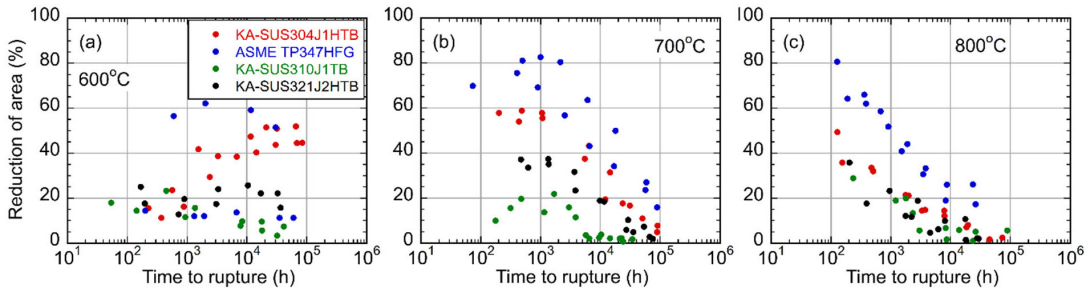


Fig. 8. Relationship between time to rupture and reduction of area for four steels. (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C. (Online version in color.)

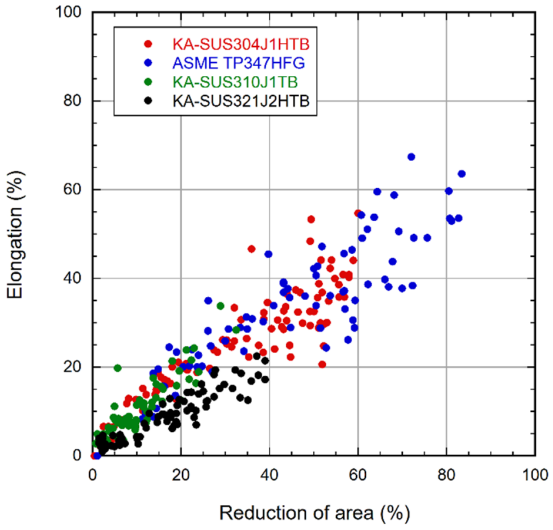


Fig. 9. Relationship between reduction of area and elongation after creep rupture at 600 to 800°C. (Online version in color.)

クリープ破断伸びと破断絞りの関係を示す。Fig. 7およびFig. 8では示していないが，Fig. 9には650℃および750℃におけるデータも含まれている。火SUS321J2HTBのデータプロットは，他の3鋼種のトレンドと異なる傾向を示している。同一の破断伸びで見ると，火SUS321J2HTBの破断絞りは他の3鋼種より大きい。つまり同鋼では，絞りが生じることによる伸びへの寄与が他の鋼種より大きいものと思われる。

4. 結論

高強度オーステナイト耐熱鋼の火SUS304J1HTB，火SUS310J1TB，ASME TP347HFG，火SUS321J2HTBについて高温引張特性，クリープ強度特性，クリープ破断延性を比較した結果，火SUS321J2HTBについて下記の結論を得た。

①高温における0.2%耐力，引張強さは，他の3鋼種と同程度あるいはそれ以下であった。破断伸びおよび絞りは，650℃までは他の3鋼種と同程度であるが，特に破断絞りは650℃を超えると低下する傾向があった。

②火SUS304J1HTBや火SUS310J1TBと同様に，高温・長時間域におけるクリープ破断強度の腰折れが確認された。650℃～750℃におけるクリープ破断強度および変形抵抗は他の3鋼種より高かった。

③他の3鋼種と同様に，クリープ破断伸びおよび破断絞りは，破断時間の増加に伴い低下し，長時間域での破断延性は極めて低かった。

利益相反に関する宣言

本研究の遂行に関する利益相反はないことを宣言する。

文　献

1) H. Kushima, K. Kimura, F. Abe, K. Yagi, H. Irie and K. Maruyama: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 131. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.86.2_131
2) K. Kimura, Y. Taniuchi, K. Sekido, T. Nojima, T. Hatakeyama and K. Sawada: *Sci. Technol. Adv. Mater.: Methods*, **5** (2025), 2588872. https://doi.org/10.1080/27660400.2025.2588872
3) M. Yaguchi: Proceedings of ASME 2024 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2024), ASME, New York, (2024). https://doi.org/10.1115/PVP2024-122116
4) K. Kimura and M. Yaguchi: Proceedings of ASME 2024 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2024), ASME, New York, (2024). https://doi.org/10.1115/PVP2024-122999
5) F. Masuyama: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 612. https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.612
6) K. Sawada, K. Sekido, M. Murata, K. Kamihira and K. Kimura: *Mater. Charact.*, **141** (2018), 279. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.055
7) H. Tezuka: *CAMP-ISIJ*, **33** (2020), 302, CD-ROM.
8) K. Kimura and K. Sawada: *J. Press. Vessel Technol.*, **144** (2022), 021507. https://doi.org/10.1115/1.4052397
9) T. Kimura, Y. Shioda and K. Kubushiro: *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, **68** (2019), 142. https://doi.org/10.2472/jsms.68.142
10) K. Sawada, T. Hatakeyama, K. Sekido and K. Kimura: *Mater. Charact.*, **178** (2021), 111286. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111286
11) K. Hashimoto, N. Saito, K. Arisue, T. Nakamura, N. Komai and K. Tominaga: *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, **62** (2025), 1. https://www.mhi.com/jp/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e621/e621080.pdf, (accessed 2026-07-12).
12) K. Sawada, K. Kimura, F. Abe, Y. Taniuchi, K. Sekido, T. Nojima, T. Ohba, H. Kushima, H. Miyazaki, H. Hongo and T. Watanabe: *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **30** (2019), 1131. https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1697616
13) NIMS Creep Data Sheet No. 56A, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, (2018).
14) NIMS Creep Data Sheet No. 58, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, (2011).
15) NIMS Creep Data Sheet No. 57A, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, (2017).
16) JIS G 0551: 2020, Steels-Micrographic determination of the apparent grain size.
17) JIS G 0555: 2020, Microscopic testing method for the non-metallic inclusions in steel.
18) JIS G 0567: 1998, Method of elevated temperature tensile test for steels and heat-resisting alloys.
19) JIS Z 2241: 2011, Metallic materials-Tensile testing-Method of test at room temperature.
20) JIS Z 2271: 2019, Metallic materials - Uniaxial creep testing in tension - Method of test.
21) The Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): The Interpretation for the Technical Standard for Thermal Power Plant, (2016), 33.
22) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, ASME International, New York, (2023), 1313.
23) The Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): The Interpretation for the Technical Standard for Thermal Power Plant, (2016), 148.
24) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, ASME International, New York, NY, (2023), 111.
25) NIMS Creep Data Sheet No. M-11, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, (2016).