

高速炉用改良 SUS316 鋼燃料被覆管の
高温ナトリウム環境下における
腐食挙動・機械的強度特性

Corrosion Behavior and Mechanical Properties of Modified SUS316 Fuel Cladding for
Fast Reactors under a High-temperature Sodium Environment

今川 裕也 豊田 晃大 鬼澤 高志 加藤 章一

Yuya IMAGAWA, Kodai TOYOTA, Takashi ONIZAWA and Shoichi KATO

大洗研究所

高速炉サイクル研究開発センター

高速炉基盤技術開発部

Fast Reactor Fundamental Technology Development Department

Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

Oarai Research and Development Institute

November 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

高速炉用改良 SUS316 鋼燃料被覆管の
高温ナトリウム環境下における腐食挙動・機械的強度特性

日本原子力研究開発機構
大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター
高速炉基盤技術開発部

今川 裕也、豊田 晃大、鬼澤 高志、加藤 章一

(2024 年 6 月 24 日受理)

これまでに国内ではナトリウム中材料試験技術の確立やナトリウム環境効果評価法の確立を目的に、高温ナトリウム環境下における高速炉用構造材料及び燃料被覆管材の研究開発が進められてきた。高速炉用燃料被覆管は一般の構造材料と異なり、通常運転時でも高速増殖原型炉「もんじゅ」の場合、高温部で 675 °C 程度となり、かつ約 0.5 mm の薄肉細管材であるために、ナトリウム接液面の腐食減肉や組成変化などの高温ナトリウム環境に起因した材料特性への影響を受けやすくなる。このため、高温ナトリウム環境下における燃料被覆管の腐食挙動や強度特性の評価が重要である。

本報告では、今後の研究活動や知見・経験の集約化などに反映することを目的に、高速炉用に開発された改良 SUS316 鋼燃料被覆管の高温ナトリウム環境下における腐食挙動や機械的強度特性に関して、これまでに得られている試験研究の知見を整理した。

**Corrosion Behavior and Mechanical Properties of Modified SUS316 Fuel Cladding for
Fast Reactors under a High-temperature Sodium Environment**

Yuya IMAGAWA, Kodai TOYOTA, Takashi ONIZAWA and Shoichi KATO

Fast Reactor Fundamental Technology Development Department
Fast Reactor Cycle System Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 24, 2024)

To establish a material testing technique in sodium and to develop a method to evaluate the sodium environmental effects, sodium tests on fast reactor fuel cladding have been carried out. Fast reactor fuel cladding is susceptible to corrosion thinning and compositional change due to sodium because of its high temperature (around 675 °C) and thin wall (about 0.5 mm) during normal operation. Therefore, it is important to evaluate the corrosion behavior and mechanical properties under a high-temperature sodium environment.

This report summarizes the results of experimental studies on corrosion behavior and mechanical properties of modified type 316 stainless steel fuel cladding applied to actual fast reactors under a high-temperature sodium environment, in order to reflect the results to future research activities and to consolidate knowledge and experience.

Keywords: Modified SUS316, Fuel Claddings, Corrosion Behavior, In-sodium Tests

目 次

1. 緒言	1
2. ナトリウム環境効果試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 腐食挙動試験方法	2
2.2.1 温度差質量移行試験	2
2.2.2 熱流束下腐食挙動試験	4
2.3 強度試験方法	4
2.3.1 ナトリウム浸漬後引張試験	4
2.3.2 ナトリウム中内圧クリープ破断試験	5
3. 試験結果	7
3.1 腐食挙動	7
3.1.1 温度差質量移行	7
3.1.2 高熱流束下における腐食挙動	9
3.2 短時間強度特性	10
3.2.1 ナトリウム浸漬後の引張強度特性	10
3.2.2 組織及び組成変化	10
3.3 内圧クリープ破断特性	11
3.3.1 ナトリウム中内圧クリープ破断特性	11
3.3.2 破損形態	12
3.3.3 組成変化	12
4. 考察	14
4.1 ナトリウム腐食速度の検討	14
4.2 強度特性に及ぼすナトリウム環境効果の検討	15
5. 結言	18
謝辞	18
参考文献	19
付録	63
付録I ナトリウム中腐食挙動データ	65
付録II 短時間強度特性データ	73
付録III 内圧クリープ破断特性データ	85

Contents

1. Introduction	1
2. Test methods for sodium environmental effect	2
2.1 Test material	2
2.2 Corrosion behavior test methods	2
2.2.1 Mass transfer test by temperature difference	2
2.2.2 Corrosion behavior test under heat flux	4
2.3 Mechanical test methods	4
2.3.1 Tensile test after sodium exposure	4
2.3.2 Internal pressure creep test in sodium	5
3. Test results	7
3.1 Corrosion behavior	7
3.1.1 Mass transfer by temperature difference	7
3.1.2 Corrosion behavior under heat flux	9
3.2 Short-term mechanical properties	10
3.2.1 Tensile strength after sodium exposure	10
3.2.2 Structure and composition changes	10
3.3 Internal pressure creep properties	11
3.3.1 Internal pressure creep properties in sodium	11
3.3.2 Form of rupture	12
3.3.3 Structural change	12
4. Consideration	14
4.1 Examination of corrosion rate in sodium	14
4.2 Examination of sodium environmental effects on mechanical properties	15
5. Conclusion	18
Acknowledgement	18
References	19
Appendix	63
Appendix-I Test data of corrosion behavior in sodium	65
Appendix-II Test data of short-term mechanical properties	73
Appendix-III Test data of internal pressure creep	85

表リスト

Table 2.1	供試材の化学組成	22
Table 2.2	供試材の冷間加工度、結晶粒径、溶体化処理条件	22
Table 2.3	流動ナトリウム中腐食挙動試験条件	23
Table 2.4	熱流束下ナトリウム中腐食挙動試験条件	23
Table 2.5	ナトリウム浸漬条件及び浸漬後引張試験条件	24
Table 2.6	内圧クリープ破断試験条件	25
Table 4.1	酸素濃度依存性に関する報告	25

List of tables

Table 2.1	Chemical components of test material	22
Table 2.2	Cold-work level, grain size and solution treatment conditions for test material	22
Table 2.3	Test conditions for corrosion behavior in flowing sodium	23
Table 2.4	Test conditions for corrosion behavior in sodium under heat flux	23
Table 2.5	Sodium immersion conditions and post-immersion tensile test conditions	24
Table 2.6	Internal pressure creep rupture test conditions	25
Table 4.1	Report on oxygen concentration dependence	25

図リスト

Fig.1.1	高速増殖原型炉「もんじゅ」の炉心燃料集合体の模式図	26
Fig.2.1	材料試験ループ 1 及び 2 のナトリウム中腐食試験部の概略図	27
Fig.2.2	腐食試験部の概念図	27
Fig.2.3	ナトリウム中酸素溶解度曲線	28
Fig.2.4	「もんじゅ」の炉心における燃料被覆管の軸方向温度分布(例)	29
Fig.2.5	熱流束下腐食挙動試験に用いたナトリウム試験ループ系統図	30
Fig.2.6	ヒーターピン内挿型腐食試験片	31
Fig.2.7	高熱流束下腐食試験時における試験片の温度分布	31
Fig.2.8	引張試験片の形状図	32
Fig.2.9	内圧クリープ試験片の形状図及び外径変化の測定位置	32
Fig.2.10	ナトリウム中内圧クリープ試験部の概念図	33
Fig.2.11	ナトリウム中内圧クリープ試験に用いた材料試験ループ系統図	34
Fig.3.1	重量損失量と腐食時間との関係(500-600 °C, 1.48 m/s)	35
Fig.3.2	重量損失量と腐食時間との関係(675 °C, 6.6 m/s)	35
Fig.3.3	腐食速度と腐食時間との関係(500-600 °C, 1.48 m/s)	36
Fig.3.4	腐食速度と腐食時間との関係(675 °C, 6.6 m/s)	36
Fig.3.5	腐食速度と下流位置との関係	37
Fig.3.6	各温度における腐食試験後の表面形態	38
Fig.3.7	腐食時間に伴う表面腐食形態及び断面組織	39
Fig.3.8	A 位置での EDS 分析結果	39
Fig.3.9	表面変質層の X 線回折結果	40
Fig.3.10	ナトリウム接液面からの深さ方向の合金組成の変化(600 °C×10,429 h)	41
Fig.3.11	ナトリウム接液面からの深さ方向の化学組成の変化(675 °C×10,888 h)	41
Fig.3.12	熱流束下腐食挙動試験後の被覆管外径の変化	42
Fig.3.13	熱流束を伴う燃料被覆管の表面腐食形態(200 W/cm ²)	42
Fig.3.14	熱流束を伴う燃料被覆管の表面組成変化(200 W/cm ²)	43
Fig.3.15	表面濃度変化に及ぼす熱流束の影響	44
Fig.3.16	燃料被覆管肉厚方向におけるホウ素濃度の変化	45
Fig.3.17	受入材の引張特性	45
Fig.3.18	ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(500 °C)	46
Fig.3.19	ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(600 °C)	46
Fig.3.20	ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(700 °C)	47
Fig.3.21	受入材、熱時効材及びナトリウム浸漬材の断面組織	48

Fig.3.22	ナトリウム浸漬後における C, B, P, Ti, Nb のバルク濃度変化(55MS)	49
Fig.3.23	ナトリウム浸漬後における C, B, P, Ti, Nb のバルク濃度変化(55MK)	50
Fig.3.24	大気中及びナトリウム中内圧クリープ破断特性(55MS&55MK)	51
Fig.3.25	Larson-Miller パラメータ法による整理	51
Fig.3.26	内圧クリープ破断伸び(55MS&55MK)	52
Fig.3.27	平均クリープ速度(55MS&55MK)	52
Fig.3.28	ナトリウム環境下における内圧クリープ破損形態の分類	53
Fig.3.29	ナトリウム中内圧クリープ破損の断面組織(700 °C×約 4,000 h)	53
Fig.3.30	ナトリウム中内圧クリープ試験後のバルク炭素濃度の変化	54
Fig.3.31	ナトリウム中内圧クリープ試験後のチタン及びニオブバルク濃度の変化	54
Fig.3.32	ナトリウム中内圧クリープ試験後のリン及びホウ素バルク濃度の変化	55
Fig.4.1	ナトリウム環境下における腐食損失の模式図	56
Fig.4.2	ナトリウム化合物の生成自由エネルギー	56
Fig.4.3	SUS316 鋼燃料被覆管の酸素濃度依存性	57
Fig.4.4	腐食速度の酸素濃度依存性	57
Fig.4.5	炉内と炉外のナトリウム中腐食速度の比較	58
Fig.4.6	ナトリウム腐食速度の評価	58
Fig.4.7	添加元素による大気中高温強度の改善効果	59
Fig.4.8	引張強度特性に及ぼすナトリウム浸漬時間の影響	59
Fig.4.9	大気中とナトリウム中のクリープ破断応力比の検討	60
Fig.4.10	ナトリウム中クリープ試験後におけるバルク炭素濃度の変化	60
Fig.4.11	クリープ試験後のホウ素及びリン濃度の変化(700 °C×約 3,000 h)	61
Fig.4.12	高温ナトリウム中におけるホウ素の拡散係数	61
Fig.4.13	ナトリウム中内圧クリープ破断特性に及ぼす微量添加元素の効果	62

List of figures

Fig.1.1	Schematic diagram of the core fuel assembly of the prototype fast breeder reactor “MONJU”	26
Fig.2.1	Conceptual diagram of the corrosion in sodium test section of material testing loop -1 and -2	27
Fig.2.2	Conceptual diagram of corrosion test section	27
Fig.2.3	Oxygen solubility curve in sodium	28
Fig.2.4	Axial temperature distribution of fuel cladding in the core of “MONJU” (example)	29
Fig.2.5	System diagram of sodium test loop used for corrosion behavior test under heat flux	30
Fig.2.6	Heater pin inserted corrosion test specimen	31
Fig.2.7	Temperature distribution of specimen during corrosion test under high heat flux	31
Fig.2.8	Schematic drawing of tensile test specimen	32
Fig.2.9	Schematic drawing of internal pressure creep specimen and creep strain measurement position	32
Fig.2.10	Conceptual diagram of in-sodium internal pressure creep test section	33
Fig.2.11	Material test loop system diagram used for in-sodium internal pressure creep test	34
Fig.3.1	Weight loss vs. corrosion time (500-600 °C, 1.48 m/s)	35
Fig.3.2	Weight loss vs. corrosion time (675 °C, 6.6 m/s)	35
Fig.3.3	Corrosion rate vs. corrosion time (500-600 °C, 1.48 m/s)	36
Fig.3.4	Corrosion rate vs. corrosion time (675 °C, 6.6 m/s)	36
Fig.3.5	Corrosion rate vs. downstream factor	37
Fig.3.6	Surface morphology after corrosion test at various temperatures	38
Fig.3.7	Surface corrosion morphology and cross-sectional microstructure with corrosion time	39
Fig.3.8	EDS analysis results at position A	39
Fig.3.9	X-ray diffraction results of surface alteration layer	40
Fig.3.10	Depth dependence of alloy composition from sodium-wetted surface (600 °C×10,429 h)	41
Fig.3.11	Depth dependence of alloy composition from sodium-wetted surface (675 °C×10,888 h)	41
Fig.3.12	Change in outer diameter of fuel cladding after corrosion behavior test under heat flux	42

Fig.3.13	Surface corrosion morphology of fuel cladding with heat flux (200 W/cm ²)	42
Fig.3.14	Surface composition change of fuel cladding with heat flux (200 W/cm ²)	43
Fig.3.15	Effect of heat flux on changes in surface concentration	44
Fig.3.16	Variation of boron concentration in the direction of fuel cladding thickness	45
Fig.3.17	Tensile properties of as-received materials	45
Fig.3.18	Tensile properties of sodium-immersed materials and thermal-aged materials (500 °C)	46
Fig.3.19	Tensile properties of sodium-immersed materials and thermal-aged materials (600 °C)	46
Fig.3.20	Tensile properties of sodium-immersed materials and thermal-aged materials (700 °C)	47
Fig.3.21	Cross-sectional microstructures of as-received, thermal-aged, and sodium-immersed materials	48
Fig.3.22	Change in bulk concentrations of C, B, P, Ti, and Nb after sodium immersion (55MS)	49
Fig.3.23	Change in bulk concentrations of C, B, P, Ti, and Nb after sodium immersion (55MK)	50
Fig.3.24	Internal pressure creep rupture properties of in-air and in-sodium (55MS&55MK)	51
Fig.3.25	Organized by Larson-Miller parameter	51
Fig.3.26	Internal pressure creep rupture elongation (55MS&55MK)	52
Fig.3.27	Average creep rate (55MS&55MK)	52
Fig.3.28	Classification of internal pressure creep failure modes in sodium environment	53
Fig.3.29	Cross-sectional microstructure of internal pressure creep rupture in sodium (700 °C× about 4,000 h)	53
Fig.3.30	Change in bulk carbon concentration after internal pressure creep test in sodium	54
Fig.3.31	Change in titanium and niobium bulk concentration after internal pressure creep test in sodium	54
Fig.3.32	Change in phosphorus and boron bulk concentrations after internal pressure creep test in sodium	55
Fig.4.1	Schematic diagram of corrosion loss in sodium environment	56
Fig.4.2	Free energy of formation of sodium compounds	56
Fig.4.3	Dependence of 316 stainless steel fuel cladding on oxygen concentration	57
Fig.4.4	Dependence of corrosion rate on oxygen concentration	57
Fig.4.5	Comparison of in-pile and out-of-pile corrosion rates in sodium	58

Fig.4.6	Evaluation of sodium corrosion rate	58
Fig.4.7	Improvement effect of high-temperature strength by added elements	59
Fig.4.8	Effect of sodium immersion time on tensile strength properties	59
Fig.4.9	Creep rupture stress ratio in-air and in-sodium	60
Fig.4.10	Change in bulk carbon concentration after creep testing in sodium	60
Fig.4.11	Change in boron and phosphorus concentrations after creep testing (700 °C× about 3,000 h)	61
Fig.4.12	Diffusion coefficient of boron in high temperature sodium	61
Fig.4.13	Effects of trace elements on in-sodium internal pressure creep rupture properties	62

1. 緒言

高速炉の冷却材にはナトリウム(Na)が適用され、プラント機器を構成するオーステナイト系ステンレス鋼などの材料とナトリウムとの共存性に関わる研究が進められてきた[1-3]。その中で、高速炉の炉心燃料集合体を構成する燃料被覆管は、中性子照射に起因した核分裂生成(FP)ガスによる内圧上昇等が生じ、かつ高温ナトリウム環境が重畳した過酷な炉内環境に耐えることが要求される。高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」とする。)の炉心燃料集合体の模式図を Fig.1.1 に示す[4]。高温ナトリウム環境の視点からみると、燃料被覆管は他の構造材料と異なり、通常運転時でも「もんじゅ」の場合、高温部で 675 °C 程度となり、かつ約 0.5 mm の薄肉細管材であるために、ナトリウム接液面における腐食減肉や組成変化などの高温ナトリウム環境に起因する材料特性への影響が現れ易くなる。このため、高温ナトリウム環境下での腐食挙動特性及びクリープ強度特性などの機械的強度特性の評価が重要となる。

これまでに高速炉燃料被覆管材料に関する数多くの試験研究が実施され、高温材料として実績が豊富なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS316 の組成をベースに、ホウ素(B)、リン(P)、チタン(Ti)やニオブ(Nb)の微量元素の添加調整によってスエリング特性やクリープ特性の改善が図られた改良 SUS316 鋼(SUS316 相当ステンレス鋼、PNC316 とも呼称されてきた。本報告書では改良 SUS316 鋼で統一する)が開発された[5]。改良 SUS316 鋼燃料被覆管は、高速実験炉「常陽」ならびに「もんじゅ」の燃料被覆管として実機に適用された材料であり[4]、また次世代ナトリウム冷却高速炉の初装荷燃料被覆管としての使用も期待されている材料である[6]。

改良 SUS316 鋼燃料被覆管を対象とした高温ナトリウム環境効果評価に関わる試験研究は、実機プラントの使用環境を模擬し、高流速ナトリウム下における腐食試験や高温下における機械的強度試験などが実施されてきた。成果は新型炉の研究開発や、炉心燃料集合体の設計用材料強度基準等(案)に反映されてきた。しかしながら、ナトリウム環境効果研究の知見は一部の研究成果[7-9]などに限られており、全体的に網羅された研究知見として十分にとりまとめられていないのが現状である。

このため、本報では改良 SUS316 鋼燃料被覆管を対象に、高温ナトリウム環境下における研究成果をレビューするとともに、「もんじゅ」の高燃焼度炉心燃料集合体を想定した使用期間(約 1.8 万時間)と同程度までの腐食挙動試験及び機械的強度試験で得られた結果を加え、これまでのナトリウム環境効果評価に関する知見を整理した。今後の研究開発、知見・経験の集約化や技術継承に有益な知見として反映できるものと考えられる。

2. ナトリウム環境効果試験方法

2.1 供試材

ナトリウム環境効果試験には製造者の異なる 2 種の改良 SUS316 鋼燃料被覆管を供試材とした。2 種の供試材をそれぞれ 55MK、55MS と呼称する。55MK 及び 55MS の化学組成を Table 2.1 に、冷間加工度、結晶粒径、溶体化処理条件を Table 2.2 にそれぞれ示す。改良 SUS316 鋼燃料被覆管の公称寸法は外径が 6.5 mm、肉厚が 0.47 mm である。

2.2 腐食挙動試験方法

2.2.1 温度差質量移行試験

温度差質量移行試験は、原子炉一次冷却系の温度分布体系を模擬したものである。原子炉一次冷却系の温度分布体系は、炉心部で発熱する温度上昇部である高温部と、その熱を中間熱交換器で熱交換する温度下降部である低温部が存在する。高温部で溶出した元素(ニッケル、クロム、マンガン、ケイ素など)が、低温部では過飽和になり析出(沈着)するため、温度差に起因した溶出・沈着(析出)現象が生じる。また、ナトリウム中の不純物(酸素)と材料(Fe)との化学的な反応は酸素濃度に概ね比例して腐食が促進される。これらの腐食は使用期間中に継続されるため、純度管理されたナトリウム条件下で高温部位における腐食減肉量(腐食速度)を評価することが特に重要となる。

試験に用いた材料試験ループ 1 及び 2 のナトリウム中腐食試験部の概略図を Fig.2.1 に示す。試験には Fig.2.1 に示すテストセクション 1~3(TS-1, TS-2, TS-3)を用いた。腐食試験に用いたナトリウム循環系統は、原子炉一次冷却系の温度分布体系を模擬し、高温部(Hot-leg)と低温部(Cold-leg)との温度差を設け、腐食試験は高温部のナトリウム流路内に腐食試験片を組み込み実施した。ナトリウム循環系統の高温部の最高温度は「もんじゅ」の燃料被覆管最高温度を模擬して 675 °C に設定した。

腐食試験部の概念図を Fig.2.2 に示す。腐食試験部には試験片取り出し口が設けられており、この部分から試験片ホルダーにセットした腐食試験片を流路内に挿入する構造となっている。腐食試験片は燃料被覆管を軸方向に一定の長さに切断したものを使用し、一片の長さは 15 mm 又は 10 mm とした。試験片取り出し口には冷却用のフィンを設けており、試験中は冷却フィンで取り出し口を冷却してナトリウムを固化させ、流路を閉塞させる。試験片ホルダーを取り出す際は閉塞させた流路付近をヒーターで加熱し、取り出し口から取り出す。試験中のナトリウム温度は加熱器によって目標温度に制御し、ナトリウム流速は電磁ポンプ出力と試験片ホルダー内の流路面積によって制御した。

試験条件を Table 2.3 に示す。一つの試験は、材料試験ループ 1 を用いて燃料被覆管の最高使用条件を想定し、ナトリウム温度 675 °C、ナトリウム流速 6.6 m/s で行った。腐食時間は最長約 10,900 時間とし、その途中過程の 1,155-9,250 時間の腐食時間を設定し、時間依存性を確認した。もう一つの試験は、材料試験ループ 2 を用いてナトリウム温度 500、550、

600℃、ナトリウム流速 1.48 m/s の条件下で、最長約 10,500 時間まで実施し、温度依存性を確認できるように設定した。ナトリウム中不純物濃度は、ナトリウム循環系統に設けられたコールドトラップの連続的な精製運転によって制御した。Fig.2.3 に示す飽和溶解度曲線[10, 11]より、コールドトラップの温度は 120℃ であることから、酸素濃度は約 1 ppm と評価される。

試験後は系統内のナトリウムを貯蔵タンク (Storage Tank: ST) に移し、系統内にアルゴンガスを流しながら常温にて腐食試験片ホルダーを試験部から引抜き、腐食試験片の表面に付着したナトリウムをアルコール洗浄し、その後アルコール中で超音波洗浄によって処理し、十分な乾燥を行い真空保管した。真空保管後は、精密天秤を用いて試験片の重量測定(10⁻⁶ g オーダー)を行い、試験前後の重量変化からナトリウムと接液する単位面積当たりの重量損失量(g/mm²)を求めた。試験後の組織変化、組成変化及び表面腐食様相を光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡、エネルギー分散型 X 線分光器(Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDS)などを用いて観察した。

単位時間当たりの腐食損失量(腐食速度)は、単位面積当たりの反応量に基づいた評価とするため、以下の式[1]を用いた。純度管理されたナトリウム環境下では局部的な腐食は生じないと考え、均一的な全面腐食を前提として評価した。

$$C_R = \varphi_{Fe}\lambda / S_0\rho t \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

- ここで、 C_R : 単位時間当たりの腐食損失量(mm/h)
- φ_{Fe} : Fe の反応モル数(mol)
- λ : 分子量(g/mol)
- S_0 : 試験片の接液表面積(mm²)
- ρ : 密度(g/mm³)
- t : 腐食時間(h)

重量損失量 $\Delta W(g) = \varphi_{Fe} \cdot \lambda$ とすると、

$$C_R = \Delta W / S_0\rho t \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

2.2.2 熱流束下腐食挙動試験

Fig.2.4 に「もんじゅ」の場合の燃料被覆管の肉厚中心の軸方向温度分布(例)を示す。Fig.2.4 に示すように、高速炉炉心では高い熱出力のため、被覆管の燃料部分では先にナトリウムと接触する上流側と下流側とで急激な温度勾配が生じる。その値は約 $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と大きいことから、この温度差に起因して被覆管に熱流束が発生する。この熱流束を伴う場合には腐食量が大きくなることを示唆する報告例がある[12, 13]ことから、熱流束下腐食挙動により確認を実施した。

試験装置の系統図を Fig.2.5 に、試験条件を Table 2.4 に示す。試験には Fig.2.5 に示す試験部(Test Section 1: TS1)を用いた。試験片形状を Fig.2.6 に示す。試験片は改良 SUS316 鋼燃料被覆管をシース材としたヒーターピン型の形状(全長 1,212 mm)である。発熱体にはニッケルクロム系電熱線(NCH-1)、絶縁材には窒化ホウ素(BN)を用い、これらを外径 6.5 mm の燃料被覆管内に挿入した後、熱伝導率を高めるため試験片全体に絞り込み加工(減径)を施し、最終外径を 5.5 mm としている。加工後は表面近傍で僅かな細粒化が認められたが、組織の著しい変化はみられなかった。発熱部の長さは 500 mm であり、燃料被覆管表面に温度測定用の熱電対が 3 カ所取り付けられている。熱電対は実機のワイヤスペーサーを模擬してピッチ 307.4 mm で燃料被覆管に巻き付けられている。試験後は、発熱部 500 mm を 10 mm 間隔に区分し、その 51 カ所の断面 4 方向を測定し、腐食減肉による寸法変化を確認した。また、試験前後の組織変化や表面腐食様相を観察した。

熱流束下腐食挙動試験では、熱流束の影響を確認するため、試験は熱出力 $80\text{ W}/\text{cm}^2$ と $200\text{ W}/\text{cm}^2$ を有する条件下で 2 回実施した。熱出力 $200\text{ W}/\text{cm}^2$ は実機を包含する設定条件である。燃料被覆管の外表面温度は約 $410\text{--}675\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、ナトリウム温度との差は最大約 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。軸方向温度勾配は約 $500\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ であり、実機の約 $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ よりも厳しい側に設定している。肉厚方向の温度分布は測定していないため明らかではないが、燃料被覆管の内外壁の温度差は最大約 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度と推定される。試験片温度分布を Fig.2.7 に示す。熱出力 $80\text{ W}/\text{cm}^2$ と $200\text{ W}/\text{cm}^2$ のナトリウム温度分布は同等であり、燃料被覆管表面のナトリウム流速は $1.2\text{ m}/\text{s}$ である。ナトリウム中の酸素濃度はコールドトラップにより制御管理され約 1 ppm である。試験部は電磁ポンプの強制循環により $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ のナトリウムが毎分 2.4 L 流入し、ヒーターピンの内部発熱により最高 $675\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで急速加熱されて流出する。

2.3 強度試験方法

2.3.1 ナトリウム浸漬後引張試験

使用期間中に高温のナトリウムにさらされる燃料被覆管は、その高温による熱的影響と、ナトリウムに接触することで固溶元素がナトリウム中に拡散溶出する現象が重畳する環境におかれる。このナトリウム環境が燃料被覆管の強度に与える影響を調査するため、温度及び時間をパラメータとした条件下でナトリウムに浸漬したナトリウム浸漬材及び不活性ガス(アルゴン)雰囲気下でナトリウム浸漬材と同一温度・時間の履歴を与えた熱時効材の両者

について高温引張試験を行い、熱的影響を分離することで、ナトリウム環境効果を評価した。試験条件を Table 2.5 に示す。浸漬又は熱時効の温度は 500、600 及び 700 °C で、浸漬又は熱時効時間は 2,000、3,500、5,000、10,000 及び 18,000 時間である。時間及び温度条件は、「もんじゅ」の高燃焼度炉心燃料集合体の使用末期時間である 18,000 時間を包絡するよう設定した。ナトリウム浸漬には熱流束下腐食挙動試験で使用したのと同じ Fig.2.5 に示す試験ループの試験部(Test Pot: TP)を用いた。Fig.2.5 の試験部(図中の TP-1~3)は、円筒型で自由液面を有する構造で、下部から常にコールドトラップによって精製されたナトリウムが毎分約 3 L 流入する。Table 2.5 よりコールドトラップの運転温度は 120 °C であるため、ナトリウム中酸素濃度は Fig.2.3 の酸素飽和溶解度式[10, 11]から求めると約 1 ppm と評価される。ナトリウム浸漬に使用した試験片形状を Fig.2.8(a)に示す。試験片は燃料被覆管から 100 mm 長さに採取し、外表面のみがナトリウムと接触するように両端に端栓を電子ビーム溶接にて溶接した。その後、試験片はナトリウム試験部の上部ノズルからステンレス製治具によって試験温度のナトリウム液中に吊り下げられ、所定時間までナトリウム中に浸漬した。所定時間に達した後ナトリウム液中から引き上げ、アルゴンガス中で常温まで冷却した。その後、試験片に付着したナトリウムのエタノール洗浄及び乾燥を行い、試験に供するまで真空保管した。熱時効についても Fig.2.8(a)に示す形状の試験片を使用した。

引張試験は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」及び FBR 金属材料試験実施要領書[14]に準拠し、大気中にて実施した。引張試験時の公称ひずみ速度は、初期から 0.5 %までは 0.25 %/min、0.5 %以降から破断までは 5.0 %/min とした。引張試験の温度はナトリウム浸漬又は熱時効の温度と同一とした。引張試験片は試験機にチャッキングするため、試験片の両端に端栓の上からスウェージロックを取り付けた。引張試験片の形状を Fig.2.8(b)に示す。標点間距離(Gauge Length: GL)は、スウェージロック端部距離としたが、スウェージロックの個体差により試験片毎に締め付け位置が若干異なるため、GL は約 82 mm とした。試験片の断面積は、GL 内 3 カ所方向の外径平均値と公称肉厚から算出した。引張試験は、同一条件下で繰り返し数 2~3 とした。

本試験では、試験中に加わった最大の力に対応する応力を引張強さ(Ultimate Tensile Strength: UTS)、0.2%オフセット耐力を 0.2%耐力(0.2% Yield Stress: YS)と定義し、伸び(Elongation: El)は破断後試験片の寸法測定値から算出した破断伸びを採用した。

試験後の成分分析は炭素、ホウ素、リン、チタン、ニオブを対象とした。炭素の分析には JIS Z 2615 の赤外線吸収法、ホウ素には JIS G 1227 のメチレンブルー吸光光度法、リンには JIS G 1214 のモリブデン青吸光光度法、チタン、ニオブには陰イオン交換分離/誘導結合プラズマ発光分光分析を適用した。

2.3.2 ナトリウム中内圧クリープ破断試験

ナトリウム中及び大気中の環境下にて内圧クリープ試験を行い、両者の特性比較によってナトリウム環境の影響を調べた。内圧クリープ試験片の形状図及び外径変化の測定位置

を Fig.2.9 に示す。試験片は燃料被覆管から 160 mm 長さに採取し、試験片の先端部と内圧ガスを導入する高圧導入管を TIG(Tungsten Inert Gas)溶接にて溶接した。溶接部及び熱影響部からの破損を防止するため、溶接近傍にステンレス製細線を巻き円周方向の膨れ(ひずみ)を拘束した。試験片の内圧は、高純度アルゴンガスを増圧器により圧縮し、高圧導入管を経て試験片に負荷・保持される。破断時間は試験片内部の圧力を圧力計にて常時計測し、その圧力の減少が生じた時とした。ナトリウム中内圧クリープ試験部の概念図を Fig.2.10 に、これを含めた全体のナトリウム材料試験ループの系統図を Fig.2.11 にそれぞれ示す。ナトリウム中試験部は円筒型で自由液面を有する構造で、下部から常にコールドトラップで純化されたナトリウムが毎分約 3 L 流入する。ナトリウム温度は試験部に組み込まれた電気式加熱器にて ± 3 °C 内に制御される。ナトリウム中酸素濃度は約 1-2.5 ppm である。

試験条件を Table 2.6 に示す。ナトリウム温度は 600、650、675、700 °C で、最長破断時間は、「もんじゅ」の高燃焼度炉心燃料集合体の寿命末期である 18,000 時間を超える時間を目標に設定した。破断後の外径変化は試験片を 10 等分し、各部位の 4 方向をマイクロメーターにて計測した。本試験では、外径変化の平均値を破断伸びと定義した。ただし、破断開口部の前後 5 mm は平均値から除外した。

3. 試験結果

3.1 腐食挙動

改良 SUS316 鋼燃料被覆管の流動ナトリウム中腐食試験によって得られたデータを付録-I に示す。500-675 °C で最長約 10,900 時間まで、約 230 点以上の腐食データを得ている。

3.1.1 温度差質量移行

(1) 重量損失及び腐食速度

流動ナトリウム環境下における重量損失量(g/mm^2)とナトリウム浸漬時間(h)との関係について Fig.3.1 に 500-600 °C の試験結果を、Fig.3.2 に 675 °C の試験結果を示す。Fig.3.1 及び Fig.3.2 では各温度の重量損失量の平均傾向を破線で表している。また、Fig.3.1 ではプロットの重なりを防ぐため、500 °C のデータはナトリウム浸漬時間を-150 時間、600 °C のデータは+150 時間し表示している。Fig.3.1 及び Fig.3.2 より、試験したすべての温度で重量損失量は時間とともに増大することがわかる。

重量損失量から求めた腐食速度($\mu\text{m}/\text{year}$)とナトリウム浸漬時間(h)との関係を Fig.3.3 及び Fig.3.4 にそれぞれ示す。Fig.3.3 及び Fig.3.4 では各温度の腐食速度の平均傾向を破線で表している。Fig.3.3 では Fig.3.1 と同様にプロットの重なりを防ぐため 500 °C のデータは-150 時間、600 °C のデータは+150 時間し表示している。Fig.3.3、Fig.3.4 から、500 °C と 550 °C は徐々に腐食速度が低下する傾向がみられる。600 °C は 8,000 時間まで、675 °C は 3,500 時間まで腐食速度が徐々に低下しているが、その後は腐食速度が一定になる傾向がみられる。高温域の 675 °C では溶出量が大きいため、時間依存性の傾向が明確に確認できる。ナトリウム浸漬時間が 3,500 時間までの腐食速度が早いナトリウム腐食初期域では、鋼中のニッケル、クロム、マンガンなどの合金元素がナトリウム中に選択的に溶出することによって腐食量が大きくなり、その後ステンレス鋼の母元素である鉄の全面腐食反応が支配的になる定常腐食域に入り腐食量はほぼ一定の速度で進行すると考えられる。

本試験では、Fig.3.3 に示すように腐食速度が非常に小さい 500-600 °C では初期腐食と定常腐食の領域は曖昧で明確には判断できないが、Fig.3.4 に示したように高温では初期腐食と定常腐食の領域が認められる。定常域における腐食速度($\mu\text{m}/\text{year}$)は、Fig.3.4 のナトリウム浸漬時間が 3,500 時間以上を定常域とすると、図に示す平均傾向の線から、675 °C、6.6 m/s、酸素濃度約 1 ppm の条件下で、10 $\mu\text{m}/\text{year}$ 弱である。

また、試験において同じ試験温度であっても試験片の設置位置(下流位置)により腐食量が異なる傾向がみられた。600 °C 及び 675 °C における腐食速度と下流位置の関係を Fig.3.5 に示す。横軸の Downstream factor は数値が大きいほど下流に位置することを示していて、L は等温領域の長さ、D は水平方向の直径を示す。Fig.3.5 から、両温度ともにナトリウムの上流から下流になるにつれて腐食速度が徐々に低下する傾向が認められる。これはナトリウムが下流側になるほど上流側で選択溶出した合金元素を多く含むようになり溶解(腐食)の駆動力が下流側で低下することや、腐食量を支配するナトリウム中の酸素濃度が上流側で消

費され下流側ほど欠乏するために下流効果が生じることが考えられている[15]。ナトリウム温度や時間の他、腐食速度はナトリウム中の酸素濃度や流速などの影響を受けることが報告されており[16]、腐食速度への影響因子については後項にて検討する。

(2) 腐食形態

腐食試験後の 500-600 °C における表面腐食形態を Fig.3.6 に、675 °C における表面腐食形態及び断面組織の観察例を Fig.3.7 に示す。表面腐食形態は電子顕微鏡により観察し、断面組織は光学顕微鏡により観察した。Fig.3.6(a)及び(b)にそれぞれ示す 500 °C 及び 550 °C では、表面にナトリウム腐食に起因する表面溶出形態は確認されなかったが Fig.3.6(c)に示す 600 °C では、表面溶出形態が若干観察された。Fig.3.7 に示す 675 °C では、平滑性の高い溶出形態が明瞭に観察され、全面腐食が生じていることがわかる。また、Fig.3.7 より時間が経過しても表面の平滑な形態に変化はなく、675 °C における腐食時間の経過に伴う有意な腐食形態の変化は見られず、表面には微細な粒子(Fig.3.7(c)の A に対応)が観察された。Fig.3.8 に示すこの粒子の EDS 分析の結果から、粒子は金属間化合物(Fe_2Mo , laves 相)と推察した。

Fig.3.7 に示す 675 °C の腐食試験後の断面組織を観察すると、10-30 μm 程度の組織変化が観察される。表面の組織変化は、坂東試薬[17]を用いてエッチング処理を施すことによって鮮明になり、このナトリウム接触表面の組織変化(表面変質層)はオーステナイト相(γ)からフェライト相(α)に相変態が生じていることが Fig.3.9 に示す X 線回折結果から明らかになった。

表面変質層の厚みは腐食時間とともに僅かに増加するが、表面変質層自身の腐食も発生する影響で長時間域では厚みが飽和する傾向にあると考えられる[18, 19]。また、表面観察、断面観察から、結晶粒の脱落や、粒界が優先的に腐食される局部腐食は観察されず、純度管理されたナトリウム環境下では表面が均一に腐食する全面腐食を呈することがわかる。

(3) 組成変化

腐食試験後のナトリウム接触表面近傍(表面から 200 μm)における主要元素の断面濃度変化を Fig.3.10(600 °C)及び Fig.3.11(675 °C)に示す。両者とも腐食時間 10,000 時間を超える試験の分析結果である。ナトリウム接液面近傍域ではクロム、ニッケル、マンガン、ケイ素の濃度減少が生じている。この減少傾向は 600 °C よりも 675 °C の方が明瞭であり、温度による違いが認められる。ナトリウム接液面近傍における組成変化は他の研究[20]によっても認められている現象であり、Fig.3.7 に示したナトリウム接液面側における表面変質層であるフェライト相はオーステナイト形成元素であるマンガン、ニッケルが溶出したことで形成したと考えられる。

3.1.2 高熱流束下における腐食挙動

(1) 腐食量

ヒーターピン内挿型の燃料被覆管の外径変化を Fig.3.12 に示す。低熱流束条件である熱出力 80 W/cm^2 の場合、発熱域の全体で外径の変化が確認されたが、外径の測定精度($1/1000 \text{ mm}$) を考えると有意な増減は確認されなかった。高熱流束条件である熱出力 200 W/cm^2 の場合は $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下の温度域で数 μm の増加がみられたが、 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える高温域では有意な増減の差は認められなかった。高温域における外径減少量を試験時間で割ることで単純に腐食速度に換算すると、年間での腐食量は数～十数 μm 程度と推定されるが、上述したとおり外径の測定精度の影響から予測精度は低い。外径変化量からは熱出力の影響を明確にできないため、腐食形態の評価や腐食挙動試験との比較から熱流束の影響を評価する必要がある。

(2) 腐食形態

熱出力 200 W/cm^2 試験後の腐食表面様相を Fig.3.13 に示す。 $410\text{-}420 \text{ }^\circ\text{C}$ では数 μm 程度の白い粒子状の微細な沈着物が観察されるが、概ね $630 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度域までは著しい腐食様相は観察されていない。 $660\text{-}670 \text{ }^\circ\text{C}$ になると、典型的な溶出腐食形態が認められる。表面の組成変化を Fig.3.14 に示す。 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の温度域ではマンガンやケイ素の濃度増加がみられるが、これは Fig.3.13 の $410\text{-}420 \text{ }^\circ\text{C}$ の表面に沈着している腐食生成物によるものと考えられる。クロムは $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の温度域と $650 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える温度域で濃度が減少し、 $540\text{-}630 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度域で濃度増加しているが、Fig.3.13 の同温度域の表面形態からは変化を確認できない。 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える温度域では、ニッケルを含め、すべての元素の濃度減少(溶出)が認められ、Fig.3.13 の $660\text{-}670 \text{ }^\circ\text{C}$ の表面形態からは顕著な溶出形態と Fig.3.7 と同様の白い析出物が確認できる。

合金元素の溶出による腐食形態が顕著にみられた $660\text{-}670 \text{ }^\circ\text{C}$ を対象とした、表面濃度変化に及ぼす熱流束の影響を Fig.3.15 に示す。受入材の表面濃度に比較して、熱流束を伴ったナトリウム中試験ではケイ素、クロム、ニッケル及びマンガンの濃度は減少するが、熱流束のない 0 W/cm^2 から高熱流束条件の 200 W/cm^2 で熱流束による明瞭な差異は認められない。溶出の起こりやすい高温($660\text{-}670 \text{ }^\circ\text{C}$)でナトリウム中に溶出しやすいホウ素の燃料被覆管断面での濃度変化に着目した分析結果を Fig.3.16 に示す。熱流束がない 0 W/cm^2 と 200 W/cm^2 のホウ素濃度の平均線を比較すると、 200 W/cm^2 の方がホウ素の溶出が少ない傾向となっている。両者の溶出の傾向や溶出の濃度変化のオーダーに変化は見られず、同程度とみなせることから、 200 W/cm^2 の範囲では熱流束の明確な影響は認められない。

3.2 短時間強度特性

3.2.1 ナトリウム浸漬後の引張強度特性

受入材及び最長 18,000 時間までのナトリウム浸漬材及び熱時効材の引張試験結果を付録-IIに示す。

受入材の引張特性を Fig.3.17 に、ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性を試験温度毎に Fig.3.18～Fig.3.20 にそれぞれ示す。Fig.3.17～Fig.3.20 では、UTS、YS、EI のそれぞれの平均傾向を受入材及び熱時効材では破線で、ナトリウム浸漬材では実線で表している。熱時効材は、ナトリウム浸漬中における熱的影響を差し引いて検討できるようにナトリウム浸漬材と同じ時間の熱履歴を与えている。つまり、ナトリウム浸漬材と熱時効材との差異がナトリウム環境の影響として現れると考えられる。ナトリウム浸漬材の UTS 及び YS は、Fig.3.18 に示す 500 °C 及び Fig.3.19 に示す 600 °C においては熱時効材のそれらと有意な差異が無いが、Fig.3.20 に示す 700 °C になると熱時効材よりも低下する傾向が認められた。EI に対しては熱時効材よりもナトリウム浸漬材で大きくなる傾向がみられた。また、Fig.3.17 の受入材と 500, 600, 700 °C の各温度で UTS と YS を比較すると、ナトリウム浸漬材と熱時効材の両者とも高温域ほど低下傾向にあり、熱的な影響による冷間加工組織の回復が一因として考えられる。700 °C の引張試験でナトリウム浸漬材が熱時効材よりも強度が低下したのは前述した冷間加工組織の回復と浸漬時のナトリウムの影響が重畳しているものと考えられる。

3.2.2 組織及び組成変化

受入材及び 10,000 時間の熱時効材、ナトリウム浸漬材の断面組織写真を Fig.3.21 に示す。各写真の上部側がナトリウム接液面である。受入時の断面組織と比較すると、それぞれ結晶粒界や粒内に炭化物の析出が認められ、600 °C 以上の高温域になるほど顕著に観察される。ナトリウム接液面近傍の組織変化に着目しても、ナトリウム浸漬材の接液面(最表面)以外は熱時効材と環境による明瞭な差異は見受けられないように思われる。

次に、ナトリウム浸漬材について引張特性に影響を与えられる炭素と、添加調整元素であるホウ素、リン、チタン及びニオブのバルク濃度変化(全肉厚の化学分析値)とナトリウム浸漬時間との関係を Fig.3.22 に 55MS のものを、Fig.3.23 に 55MK のものを示す。図中の破線は受入時の濃度を示す。はじめに、55MS と 55MK の時間による濃度変化に着目すると、両鋼種とも同じ挙動を示しており、鋼種間の差は認められないことから、区別なく述べる。炭素濃度は各温度の 10,000 時間で受入時よりも若干の濃度上昇が観察されるが、500-700 °C において温度の影響による大きな変化は認められない。改良 SUS316 鋼燃料被覆管の開発経緯[5]にあるように、炭素と安定な炭化物を形成するチタン、ニオブを添加したことで、炭素の溶出(脱炭)が抑制されていることがわかる。リン、チタン及びニオブ濃度はナトリウム浸漬時間によって若干の増減がみられるが、温度による明瞭な変化はないように思われる。これに対し、ホウ素濃度は、高温、長時間浸漬になるほど減少する傾向がみられ、特に 700 °C で顕著である。ホウ素は炭化物の成長、粗大化を抑制し、微細に分散析出させ

るために添加しているが、ホウ素の溶出に伴う炭化物の微細分散析出の効果が失われることで、ナトリウム浸漬後の 700 °C での引張強度が低下したものと考えられる[4, 21]。

3.3 内圧クリープ破断特性

3.3.1 ナトリウム中内圧クリープ破断特性

内圧クリープ破断試験で得られた結果を付録-IIIに示す。大気中データは委託研究[22]にて取得されたものも含まれる。ナトリウム中及び大気中ともに、10,000 時間を超える長時間域の内圧クリープ破断データが得られている。

ナトリウム中クリープ破断強度を大気中と比較して Fig.3.24 に示す。55MS と 55MK はナトリウム中、大気中ともにクリープ破断強度の差はほとんど無かったため、図では鋼種を区別せずプロットしている。Fig.3.24 の図中で示される曲線は、Larson-Miller パラメータ法 (LMP 法)を用いて大気中及びナトリウム中のそれぞれの平均傾向を示したもので、破線は大気中試験の LMP 法の式を、実線はナトリウム中試験の LMP 法の式を示している。LMP 法の式 $LMP=T(C+\log t_R)$ における定数 C の値は、大気中又はナトリウム中のデータを用いて回帰された値を用いた。

(大気中)

$$\begin{aligned} LMP &= T(17.0947 + \log t_R) \times 10^3 \\ &= 5.13493 \times 10^4 - 4.19216 \times 10^4 (\log \sigma) + 2.04741 \times 10^4 (\log \sigma)^2 - 3.58844 \times 10^3 (\log \sigma)^3 \cdots \cdots (3.1) \end{aligned}$$

(ナトリウム中)

$$\begin{aligned} LMP &= T(17.4372 + \log t_R) \times 10^3 \\ &= 8.69579 \times 10^4 - 9.41317 \times 10^4 (\log \sigma) + 4.54302 \times 10^4 (\log \sigma)^2 - 7.47487 \times 10^3 (\log \sigma)^3 \cdots \cdots (3.2) \end{aligned}$$

ここで、T:温度(K), t_R :破断時間(h), σ :周応力(MPa)である。

650 °C では大気中とナトリウム中のクリープ破断強度に有意な差は認められないが、675 °C の長時間域及び 700 °C になると、ナトリウム中の内圧クリープ破断強度は大気中よりも低下する傾向が認められる。特に、700 °C の数千時間を超える長時間域になると、明らかなナトリウム中のクリープ破断強度の低下が認められる。

上記の(3.1)式を用いたクリープ破断特性の整理結果を Fig.3.25 に示す。図から、高温又は長時間に相当する高 LMP ほどナトリウム中試験のプロットは大気中試験のプロットよりも低応力側に位置することから、Fig.3.24 と同様、大気中に比べナトリウム中のクリープ強度が低下することがわかる。

内圧クリープ試験後のクリープ破断伸びを Fig.3.26 に示す。被覆管の破断部近傍以外の外径変化の平均値であるクリープ破断伸びは、破断時間によらず概ね数%と小さい値であるため、被覆管のクリープ変形に起因する流路閉塞は抑制できると考えられる。また、破断伸びと破断時間から求めた平均クリープ速度を Fig.3.27 に示す。図中の破線はナトリウム中試験の平均クリープ速度の平均傾向を示す。675 °C ではナトリウム中と大気中の平均クリープ速度は概ね同等であるが、700 °C の低応力域を比較するとナトリウム中の方が大気中より

もやや大きな値を示していた。

3.3.2 破損形態

ナトリウム中における内圧クリープ破損形態は、①燃料被覆管の軸方向に沿って生じる微細な割れによる破損(Fissure type)、②小さなピンホール状の破損(Pinhole type)及び③燃料被覆管外径の膨れを伴って開口状を呈する破損(Violent type)の3つに大別される。これらの破損形態を観察・分類し、整理した結果を Fig.3.28 に示す。低温・短時間(高応力)側では燃料被覆管の軸方向に沿って比較的大きな割れ形態を呈する Violent type が、高温・長時間(低応力)側では軸方向に微細なクラック状の形態を呈する Fissure type が支配的となる傾向が認められる。また、極微小な孔のような形態を呈する Pinhole type が僅かな数で認められる。この傾向は大気中における破損形態と類似しており[23]、ナトリウム環境がもたらす特有な破損形態ではないと思われる。

700℃のナトリウム中における内圧クリープ破損の断面組織の一例を Fig.3.29 に示す。円筒タイプにおける板厚方向の応力分布を試算すると、周方向応力は内面側の方が高くなると考えられる。このため、周応力が大きくなる燃料被覆管の内面側からき裂が生じやすくなることが推定される[24]が、内圧クリープ破断後における断面組織を観察すると、微細なき裂は燃料被覆管の外面側(ナトリウム接液側)から主に粒界に沿って生じていることが確認される。また、破損部近傍のナトリウム接液面では、燃料被覆管の軸方向に沿った微細な浅い割れが複数観察されるケースも存在する。この破損様相は開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管や ODS 鋼燃料被覆管でも確認されており[21, 24]、次項で述べるナトリウム接液面近傍における組成変化や組織変化などのナトリウム環境による影響が示唆される。

3.3.3 組成変化

ナトリウム中内圧クリープ試験後のバルク炭素濃度変化を Fig.3.30 に示す。添加調整元素であるチタン及びニオブの濃度変化を Fig.3.31 に、リン及びホウ素の濃度変化を Fig.3.32 にそれぞれ示す。開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管の場合は 650℃以上の高温域において引張強度やクリープ破断強度の低下が認められ、この要因は炭素濃度の低下(脱炭)が示唆されている[25]。しかし、改良 SUS316 鋼燃料被覆管の場合は Fig.3.30 に示す通り 700℃の高温及び長時間域でも脱炭傾向は明瞭に認められない。

改良 SUS316 鋼燃料被覆管の添加調整元素についてナトリウム中内圧クリープ試験後のバルク濃度変化を調べると、僅かなチタン濃度の低下が 650℃及び700℃で認められるが、時間による依存性は小さい。ニオブ濃度は温度や時間によらず、ほとんど変化が認められない。これは、熱力学的に安定な炭化チタン(TiC)や炭化ニオブ(NbC)が析出することで高温ナトリウム中でも有意な脱炭が生じなかったためと考えられる。

添加調整元素であるリンやホウ素は、大気中のクリープ強度を改善することが知られている[26-28]。リンやホウ素は $M_{23}C_6$ の微細分散析出効果など炭化物の析出形態に対する寄

与効果が大きく、この良好な析出状態が維持され強度向上に関与していることが考えられる。しかしながら Fig.3.32 に示すように、高温ナトリウム中ではこれら元素の溶出による濃度低下が認められ、特に 700 °C になると時間とともにホウ素の濃度低下が顕著となっている。高温ナトリウム環境下における炭素や添加調整元素の濃度変化が及ぼす強度特性への影響については、後章で考察する。

4. 考察

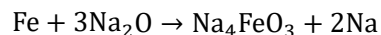
4.1 ナトリウム腐食速度の検討

3.1 項に示した流動ナトリウム中腐食試験の試験結果から、ナトリウム中での改良 SUS316 鋼燃料被覆管の腐食速度評価式を策定するため、ここでは腐食速度に影響を及ぼすと考えられる要素である腐食形態、酸素濃度、流速、中性子照射の影響について公開されている資料をもとに検討する。

ナトリウムの腐食過程のひとつは材料を構成する合金元素の溶出(Selective loss)と、もうひとつはナトリウム中不純物の酸素との化学的な反応によって生じる(Bulk loss)と考えられている[3, 16]。腐食過程の概念図を Fig.4.1 に示す。

前者の合金元素の溶出はナトリウム中飽和溶解度に依存し、ステンレス鋼ではニッケル、クロム、マンガンなどの合金元素がナトリウム中に選択的に溶出する[16]。この選択的な合金元素の溶出は腐食初期の領域で顕著に現れる。また、発熱部(高温部又は温度上昇部)と熱交換部(低温部又は降温部)をもち、温度分布が系統内に存在している場合は、発熱部で溶出した元素が熱交換部で過飽和となって析出(沈着)するため、溶出と析出、いわゆる温度差による質量移行現象が時間とともに継続される。燃料被覆管の部位は温度上昇を伴う発熱部であり、主として構成元素の溶出現象に伴う腐食が生じる。本試験結果においても、燃料被覆管のナトリウム接液面側において合金元素濃度の減少が認められる。この溶出現象は鋼中の元素の拡散速度に律速され、高温側ほど顕著に表れる温度依存性が認められる。温度依存性については、ステンレス鋼の国内外研究例が評価されており、腐食速度に対する活性化エネルギー値の大きな差異はないと報告されている[3, 16]。

酸素濃度の影響については多くの研究者によっても報告されている[29-32]。ナトリウム中の酸素は主に酸化ナトリウム(Na_2O)として存在し、例えば以下の式のように母相の鉄と反応する[2]。



Na_2O は鉄を単独で直接酸化させることはできないが、Fig.4.2 に示すようにエネルギー的により安定な Na-Fe-O 系の複合酸化物を生成することで鉄を酸化させることができると考えられる[33]。つまり、腐食過程においては酸化物の反応過程が支配的であるため、腐食速度 C_R と溶存酸素濃度 $[\text{O}_2]$ の間には「 $C_R \propto [\text{O}_2]^n$ 」の関係が成り立つ[3]。ここで n は定数である。酸素濃度の依存性に関する報告例を Table 4.1 に示す。また、開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管及び Thorley ら[29]の酸素依存性に関する研究結果例を Fig.4.3 と Fig.4.4 に示す。酸素濃度依存性は「 $n \approx 1$ 」前後であり、腐食速度は酸素濃度に概ね比例して増大すると考えられる。

また、腐食挙動に対してはナトリウム流速も関与し、腐食速度は流速依存性がなくなる、いわゆる「臨界流速」まではナトリウム流速とともに増大するが、臨界流速に達すると腐食速度は一定となるとする研究結果がある。例えば、Thorley ら[29]の結果では 3.8 m/s 以上、

Roy ら[31]の結果では 6-7 m/s が限界流速となっている。また、Kolster ら[32]は約 3 m/s を限界流速としている。

一方、高速中性子照射環境下の炉内ナトリウム腐食挙動については鶴飼らの研究[34]があり、炉外と炉内における腐食形態や腐食量などを比較検討している。腐食速度に関する研究結果の一例を Fig.4.5 に示す。炉内における改良 SUS316 鋼燃料被覆管のナトリウム腐食速度(●プロット)は、直線で示す本試験で得られた炉外データ(oプロット)のばらつきの範囲内に収まっており、腐食速度は概ね同等であることが報告されていることから、腐食速度への中性子照射の影響はほとんどないものと考えられる。また、海外の炉内研究で得られた腐食速度(■プロット)もほぼ炉外データのばらつき内に包含されており、国内での試験結果と同じく腐食速度への中性子照射の影響はほとんどないものと考えられる。

腐食特性に対する影響因子や金属組織学的な観察を踏まえ、純度管理されたナトリウムによる腐食は合金元素の溶出を伴う全面腐食であり、局部腐食は認められていないことや、Fig.3.3 と 3.4 に示すように腐食開始からある時間までは腐食速度が速く、それ以降は腐食速度がほぼ一定となる定常腐食域に移行することから、腐食速度は絶対温度の逆数に依存する Arrhenius の式で表すことができる。

これらの特性を評価した上で改良 SUS316 鋼燃料被覆管の腐食速度評価式を検討した。定常腐食域における実験データと温度との関係を Fig.4.6 に示す。図には定常腐食域における腐食データをプロットしており、温度 550-675 °C、流速 6.6 m/s、酸素濃度 1 ppm のナトリウム環境条件である。なお、本試験の 6.6 m/s の試験データは前述の臨界流速に達していると考えられるためそのまま適用するが、1.48 m/s の試験データは腐食速度に係数 $[(6.6 \text{ m/s})/(1.48 \text{ m/s})]$ を掛けて値を大きくし、保守的に評価した。

本実験で最小二乗法により得られた腐食速度の平均式は(4.1)式のとおりである。

$$C_{Na} = 6.873 \times 10^9 \cdot \exp\{-1.917 \times 10^4 / (T_i + 273.15)\} \cdot O_{x_i} \cdots \cdots (4.1)$$

また、腐食速度の 95%信頼上限式は(4.2)式のとおりである。燃料設計等においては保守的な評価を与える(4.2)式が推奨される。

$$C_{Na} = 4.927 \times 10^8 \cdot \exp\{-1.647 \times 10^4 / (T_i + 273.15)\} \cdot O_{x_i} \cdots \cdots (4.2)$$

ここで、 C_{Na} :腐食速度($\mu\text{m}/\text{year}$)、 T_i :ナトリウム接液面温度($^{\circ}\text{C}$)、 O_{x_i} :ナトリウム中の酸素濃度(ppm)である。

上記式は、ナトリウム接液面温度は 400-700 °C を適用範囲としている。酸素濃度は、10 ppm 程度までは濃度に比例して腐食速度が増加することが確認されていること[16, 35]、材料試験ループを用いた他のナトリウム中試験でのナトリウム純度管理の実績や常陽の運転実績[36]を加味し、達成可能な酸素濃度範囲である 5 ppm 以下を適用範囲としている。

4.2 強度特性に及ぼすナトリウム環境効果の検討

前述したように改良 SUS316 鋼燃料被覆管は高温強度の向上を狙いホウ素、リン、チタン、ニオブが添加調整されており、高温強度特性の改善が図られている。一例として、大気中の

650 °C における引張強度及び 10,000 時間クリープ破断強度の推移を Fig.4.7 に示す[4]。Fabrication Sequence は SUS316 鋼燃料被覆管の製造回数を示し、本研究で使用した 55MS 及び 55MK は 11th にあたる。短時間強度及びクリープ破断強度は冷間加工度の最適化や、ホウ素、リンの添加調整及びチタン、ニオブの添加調整、あるいは添加量の最適化によって向上し、製造を重ねる毎に改善されていることがわかる。

一方、3.2 項の短時間強度特性、3.3 項の内圧クリープ破断特性で示したように、高温ナトリウム環境下では、大気中に比較して短時間強度及びクリープ破断強度の低下が認められ、高温又はナトリウムへの浸漬が長時間になるほど強度低下が顕著になる傾向がある。ここでは、これらの強度特性に及ぼすナトリウム環境の影響について検討する。

本試験で得られたナトリウム浸漬材と熱時効材との引張強さ及び 0.2%耐力の強度比(ナトリウム浸漬材/熱時効材)と時間の関係を Fig.4.8 に示す。500 °C 及び 600 °C では強度低下は確認されないが、700 °C になるとナトリウム浸漬材の強度低下は時間とともに大きくなる傾向が認められた。18,000 時間では同一条件の熱時効材と比較して、引張強さで 10%程度、0.2%耐力で 13-14%程度の低下量である。

次に、クリープ破断強度に及ぼすナトリウム環境の影響を検討するため、100 時間、1,000 時間及び 10,000 時間のクリープ破断時間に相当する周応力を大気中は式(3.1)から、ナトリウム中は式(3.2)からそれぞれ求め、その応力比「ナトリウム中/大気中」を整理した結果を Fig.4.9 に示す。図から、高温かつ長時間になるほど所定の破断時間に相当する応力は大気中に比べてナトリウム中では低くなることがわかる。以上のことから、高温・長時間域になるとクリープ破断強度に対するナトリウム環境の影響が明らかに認められる。

開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管の高温域における強度低下は、ナトリウム環境下での鋼中炭素濃度の低下(脱炭現象)が要因として考えられてきた[25]。しかし、本研究で使用した改良 SUS316 鋼燃料被覆管では Fig.4.10 に示すナトリウム中クリープ試験後の炭素濃度の変化のように、開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管と比較して脱炭現象は明瞭ではなく、強度低下は脱炭現象以外の要因が関与していることが考えられる。改良 SUS316 鋼燃料被覆管の脱炭現象が抑制された理由としては、チタンやニオブの添加調整により熱力学的に安定な TiC や NbC が析出し、鋼中の炭素活量が低下したことが考えられる。チタンやニオブは Fig.3.22 と Fig.3.33 に示すようにナトリウム中試験後においても有意な濃度変化は示しておらず、高温ナトリウム中でも脱炭現象の抑制に効果的であると考えられる。

一方、添加調整元素であるホウ素、リンは Fig.3.22 と Fig.3.33 に示すようにナトリウム中への溶出が認められ、特にホウ素の溶出が顕著に認められた。ホウ素が材料表面からナトリウム中に溶出することは、Borgstedt ら[20]によっても確認されている現象である。ホウ素及びリンについて、ナトリウム中におけるクリープ試験前後の二次イオン質量分析の結果を Fig.4.11 に示す。図では白い箇所ほどホウ素又はリンの濃度が高いことを示す。ホウ素の場合、受入材では粒界及び粒内にホウ素が検出され、特に粒界で明瞭に検出されていることがわかる。しかし、700 °C のナトリウム中試験材になると、粒界にホウ素が検出されているが、

受入材に比較すると濃度低下が生じており、その濃度低下は燃料被覆管の肉厚中央部(1/2t)においても生じている。リンの場合は、ナトリウム接液面で著しく濃度低下が生じている。本研究試験で得られた濃度変化をベースに、高温ナトリウム中におけるホウ素の拡散係数を試算した結果を Fig.4.12 に示す。Fig.4.12 にはクリープ試験材と腐食試験材の温度毎の拡散係数の平均傾向を実線で示し、参考として γ 鉄中でのホウ素の拡散係数[37]を破線で示している。ホウ素の拡散係数は、ナトリウム中に溶出する拡散量から以下の式を用いて算出した[38]。

$$M(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt}(C_0 - C_s) \cdot \cdot \cdot \cdot (4.3)$$

ここで、 $M(t)$ は時間 t におけるホウ素の総溶出量、 D は拡散係数、 C_0 はホウ素の初期濃度、 C_s はホウ素の表面濃度、 t は試験時間である。 C_s は断面濃度の分析結果から求めた。計算により求めたホウ素の拡散係数は γ 鉄中でのホウ素の拡散係数と大きな差はないことから計算結果は妥当であると考えられる。クリープ試験材のホウ素の拡散係数は腐食試験材よりも大きな値であるが、これは応力の促進によるものと考えられる。また、クリープ試験材、腐食試験材ともに拡散係数の平均傾向は右肩下がりであることから、高温ほどホウ素はナトリウム中へ拡散しやすいことがわかる。ホウ素やリンは $M_{23}C_6$ の微細分散析出効果など炭化物の析出形態に対する寄与効果が大きく、この良好な析出形態がクリープ強度の向上に大きな役割を果たしていると考えられるが、高温ナトリウム環境下においてはホウ素やリンの溶出によってこれらの効果が失われるために、強度特性の低下を招いた一因と考えられる。

炉内ナトリウム環境下における改良 SUS316 鋼燃料被覆管のクリープ破断特性については鶴飼らの報告がある[39]。この報告によれば、クリープ破断強度の低下は上記と同様なホウ素やリンのナトリウム中への溶出と、加えて製造時の冷間加工によって導入された転位の回復が照射によって促進されることが要因と考えられている。特に、低温・短時間域ではホウ素やリンの溶出は生じ難いが、照射による転位回復が早期に生じている。このため、短時間域では照射環境の影響が、高温長時間域ではナトリウム環境の影響がクリープ破断強度の低下傾向を招くものと考えられている。

ここまでに示したように、ナトリウム環境下では高温長時間域でクリープ破断強度などの低下が認められ、高温強度特性を評価する上ではナトリウム環境の影響に配慮する必要があると考えられる。しかしながら、Fig.4.13 に示すように改良 SUS316 鋼燃料被覆管のクリープ破断強度は開発途中段階の SUS16 鋼燃料被覆管に比較して高温ナトリウム環境下でも著しく改善されており、チタン、ニオブなどの微量添加元素の効果が認められる。

5. 結言

高速炉用改良 SUS316 鋼燃料被覆管(ホウ素、リン、チタン、ニオブ添加調整材)について、ナトリウム環境下における腐食挙動試験(500-675 °C×最長約 11,000 時間)、短時間強度試験(500-700 °C×浸漬又は熱時効最長 18,000 時間)及びクリープ破断試験(600-852 °C×最長約 20,000 時間)で得られた試験データやこれまでの知見をベースに、高温ナトリウム環境効果評価を整理した。

- (1) 不純物(主に酸素)濃度が管理されたナトリウム環境下では、粒界腐食などの局所的な腐食は認められず、均一的な全面腐食として腐食量を評価できる。また、腐食に対する温度及びナトリウム中酸素濃度の影響は、これまでに国内外で得られたオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同じ依存性を示す。腐食挙動に対する熱流束の影響は明瞭に認められない。
- (2) 温度及び酸素濃度依存性を考慮し、定常腐食速度域の腐食試験データから改良 SUS316 鋼燃料被覆管の腐食速度式を提案した。ナトリウム接液面温度 T_i (°C)、酸素濃度 O_{x_i} (ppm)における腐食速度 C_{Na} は次式のとおりである。保守的な評価には 95%信頼上限値の腐食速度式が推奨される。
 平均値 ; $C_{Na} = 6.873 \times 10^9 \cdot \exp\{-1.917 \times 10^4 / (T_i + 273.15)\} \cdot O_{x_i}$
 95%信頼上限値 ; $C_{Na} = 4.927 \times 10^8 \cdot \exp\{-1.647 \times 10^4 / (T_i + 273.15)\} \cdot O_{x_i}$
- (3) 改良 SUS316 鋼燃料被覆管の短時間強度及びクリープ破断強度は、高温域及び長時間域になるほどナトリウム環境の影響によって大気中のそれらよりも低下する傾向が認められる。特に 700°C では有意な強度低下が認められ、ナトリウム環境の影響を考慮する必要があると考えられる。
- (4) 強度低下の要因は、試験後の組成分析や組織観察などから微量添加元素であるホウ素やリンのナトリウム中への溶出によって炭化物の微細分散析出効果が失われることが考えられる。チタン及びニオブはナトリウム中への溶出がほとんど認められず、開発途中段階の SUS316 鋼燃料被覆管で認められていた脱炭現象を抑制する効果をもたらしていると考えられる。

以上、これまでに得られた改良 SUS316 鋼燃料被覆管に関するナトリウム環境効果評価の知見は、今後の研究開発及び技術継承などに反映できるものと考えられる。

謝 辞

本技術資料を作成するに当たり、原子力機構 OB の吉田英一氏に多大なご協力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- [1] 吉田英一, 材料分野におけるナトリウム技術報告; 高温ナトリウム環境中の材料腐食・強度特性等について, JAEA-Review 2013-026, 2013, 151p.
- [2] Yoshida, E., Furukawa, T., Chapter 21: Corrosion issues in sodium-cooled fast reactor (SFR) systems, Nuclear corrosion science and engineering, Woodhead Publishing Series in Energy, 2012, pp.773-804.
- [3] Furukawa, T., Yoshida, E., Chapter 5.13: Material Performance in Sodium, Comprehensive Nuclear Materials, Elsevier, vol.5, 2012, pp.327-341.
- [4] 敦賀総合研究開発センター, 高速増殖原型炉もんじゅ; その軌跡と技術成果, JAEA-Technology 2019-007, 2019, 159p.
- [5] 立石嘉徳ほか, 高速炉炉心材料用改良 SUS316 ステンレス鋼の開発, 日本原子力学会誌, vol.30, no.11, 1988, pp.1005-1019.
- [6] 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, 日本原子力発電株式会社, 高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT プロジェクト) -フェーズ I 報告書-, JAEA-Evaluation 2011-003, 2011, 303p.
- [7] 飯塚昇司ほか, 高速炉用改良 SUS316 ステンレス鋼燃料被覆管の高温材料強度データ集; 材料開発室で得られた大気中及びナトリウム中材料強度試験結果について, PNC TN9450 88-004, 1988, 140p.
- [8] 吉田英一, 和田雄作, 高温ナトリウム環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼のクリープ特性, 第 41 期第 2 回高温強度部門委員会講演会資料, 日本材料学会, 1992, pp.25-31.
- [9] 吉田英一, 燃料被覆管微量元素の Na 中溶出挙動に及ぼす流速とクリープの影響, 第 33 回高温強度シンポジウム, no.4, 1995, pp.16-20.
- [10] Eichelberger, R. L., The Solubility of Oxygen in Liquid Sodium: A recommended expression, Atomic International, 1968, 21p, AI-AEC-12685.
- [11] 武田邦雄ほか, 真空蒸留法による液体ナトリウム中の酸素溶解度の測定, 日本原子力学会予稿集 昭和 50 年秋の分科会, 1975, p.206.
- [12] Hopenfeld, J., Corrosion of Type316 stainless steel with surface heat flux in 1200°F flowing sodium, Nuclear Engineering and Design, vol.12, issue 2, 1970, pp.167-179.
- [13] Shiels, S. A. et al., The influence of LMFBR fuel pin temperature profiles on corrosion rate, Proceedings of International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production, Champion, USA, 1976, pp.386-392.
- [14] 「FBR 金属材料試験実施要領書」作成ワーキンググループ, FBR 金属材料試験実施要領書, PNC TN241 77-03, 1977, 88p.
- [15] Eichelberger, R. L. et al., Corrosion/78: The International Corrosion Forum Devoted Exclusively

- to the Protection and Performance of Materials, Houston, USA, 1978, Paper 106.
- [16]丸山昭ほか, 高温ナトリウム中におけるオーステナイト・ステンレス鋼の腐食速度評価式, 日本原子力学会誌, vol.26, no.4, 1984, pp.327-338.
- [17]松村理, 坂東誠志郎, 着色腐食法による複合組織鋼の顕微鏡組織の分別とその応用, 熱処理, vol.32, no.6, 1992, pp.321-326.
- [18]Yoshida, E. et al., Post-corrosion and metallurgical analyses of sodium piping materials operated for 100,000 hours, Liquid Metal Systems, Plenum press, 1995, pp.55-66.
- [19]野村茂雄ほか, SUS304 母材及び溶接接手のナトリウム中腐食速度と表面変質層厚さ, 日本原子力学会予稿集 昭和 57 年秋の分科会, 1982, p.72.
- [20]Borgstedt, H. U., Mathews, C. K., Applied chemistry of the alkali metals, Plenum press, 1987, 282p.
- [21]Yoshida, E. et al, Liquid Metal Engineering and Technology vol.2: Proceedings of the Third International Conference held in Oxford on 9-13 April 1984, BNES, 1984, p.463.
- [22]FBR 燃材専門委員会 クリープサブグループ, 高速炉用燃料被覆管 SUS316 相当鋼のクリープ特性評価 -第 1 次試験から第 12 次試験までの総括-, PNC TN241 85-19, 1986, 119p.
- [23]FBR 材料専門委員会 クリープサブグループ, 高速炉用燃料被覆管のクリープ試験(第 12 次クリープ試験), PNC TN241 83-19, 1983, 83p.
- [24]Yoshida, E., Kato, S., Sodium compatibility of ODS steel at elevated temperature, Journal of Nuclear Materials, vol.329-333, Part B, 2004, pp.1393-1397.
- [25]柚原俊一ほか, 高温ナトリウム中における高速炉用燃料被覆管のクリープ特性, 材料, vol.24, no.258, 1975, pp.240-246.
- [26]太田定雄ほか, 18-8Mo 鋼冷間加工材のクリープ破断強度に及ぼす B, C 量の影響, 鉄と鋼, vol.66, no.4, 1980, p.459.
- [27]太田定雄ほか, 高速炉燃料被覆管用 18-8Mo ステンレス鋼冷間加工材の高温強度におよぼす化学成分の影響, 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, vol.17, no.2, 1976, pp.147-158.
- [28]井上利彦ほか, 材料が支える原子力システム より良い信頼性のために 第 2 回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼, 日本原子力学会誌, vol.53, no.9, 2011, pp.638-642.
- [29]Thorley, A. W., Tyzack, C., Corrosion and mass transport of steel and nickel alloys in sodium systems, Liquid Alkali Metals: Proceedings of the International Conference held at Nottingham University on 4-6 April 1973, Nottingham, UK, 1973, pp.257-273.
- [30]Zebroski, E. L. et al, Effect of mass transfer, and of changes in properties, on austenitic steels in flowing sodium, Alkali Metal Coolants: Proceedings of a Symposium, Vienna, 28 November – 2 December 1966, Vienna, Austria, 1967, pp.195-211.
- [31]Roy, P., Licina, G. J., Interdependence of various parameters on corrosion of stainless steel heat exchanger materials in flowing sodium, ASME Technical Report, 74-PWR-19, 1975, 7p.
- [32]Kolster, B. H., Bos, L., Corrosion transport and deposition of stainless steel in liquid sodium,

- Proceedings of International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production, Champion, USA, 1976, pp.368-377.
- [33]Furukawa, T. et al., The high-temperature chemical reaction between sodium oxide and carbon steel, Proceedings of the Symposium on High Temperature Corrosion and Material Chemistry, vol.98-9, San Diego, USA, 1998, pp. 312-323.
- [34]Ukai, S. et al., Quantitative characterization on dissolution and deposition behavior of SUS316 stainless steel cladding constituents under flowing sodium in fast reactors, Material for nuclear reactor core applications: Proceedings of an international conference held in Bristol on 27-29 October 1987, Bristol, UK, 1987, pp.341-348.
- [35]前田清彦ほか, 高速増殖炉技術読本, PNC TN9520 91-006, 1991, 854p.
- [36]ナトリウム教育委員会, ナトリウム技術読本, JNC TN9410 2005-011, 2005, 794p.
- [37]日本金属学会, 改訂3版 金属データブック, 丸善出版, 1993, 651p.
- [38]Crank, J., The Mathematics of Diffusion Second Edition, Clarendon Press, 1975, 414p.
- [39]Ukai, S. et al., In-reactor creep rupture properties of 20% CW modified 316 stainless steel, Journal of Nuclear Materials, vol.278, issues 2-3, 2000, pp.327-329.

Table 2.1 供試材の化学組成

Cladding tube	Chemical compositions (wt.%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	B
55 MK	0.052	0.82	1.83	0.028	0.009	13.84	16.52	2.49	0.01	0.0031	
55 MS	0.047	0.92	1.74	0.030	0.004	13.74	16.50	2.50	0.005	0.0039	

Cladding tube	Chemical compositions (wt.%)										
	N	Cu	Ti	V	Nb(+Ta)	As	Al	Zr	O	Fe	Fe
55 MK	0.003	0.01	0.080	0.01	0.079	0.002	0.016	0.005	0.0016	Bal.*	Bal.*
55 MS	0.0077	0.002	0.097	0.002	0.070	0.002	0.040	0.005	0.0018	Bal.*	Bal.*

*Bal. : Balance

Table 2.2 供試材の冷間加工度、結晶粒径、溶体化処理条件

Cladding tube	Cold-work level	Grain Size ASTM No.	Solution treatment
55 MK	19-20	8.0-8.5	1080 °C×2 min
55 MS	19-20	8.3-8.8	1085 °C×1 min

Table 2.3 流動ナトリウム中腐食挙動試験条件

	Test temp. °C	Sodium velocity m/s	Re number	CT temp. °C	Oxygen level ppm	Test time h
Material testing loop -2	500	1.48	1.8×10^4	120	$\div 1$	2,600-10,429
	550					
	600					

TS-1~TS-3: Test section CT: Cold-trap

Table 2.4 熱流束下ナトリウム中腐食挙動試験条件

Test No.	Heat flux W/cm ²	Maximum temp. °C		Minimum temp. °C		Sodium velocity m/s	CT temp. °C	Oxygen level ppm	Test time h
		Sodium surface	Specimen surface	Sodium surface	Specimen surface				
RUN-1	80	660	675	400	420	1.2	120	$\div 1$	1,800
RUN-2	200	642	676	400	414	1.2	120	$\div 1$	2,000

Table 2.5 ナトリウム浸漬条件及び浸漬後引張試験条件

Condition	Exposed or aged temp.		Sodium velocity	Oxygen level	CT temp.	Exposed or aged time	Tensile test temp.		Tensile test method
	°C	°C					h	°C	
Sodium exposed	500	120	<0.01	≒ 1	—	2,000 3,500 5,000 10,000 18,000	500	JIS G 0567	
	600						600		
	700						700		
Thermal aged (in Ar)	500	—	—	—	—	2,000 3,500 5,000 10,000 18,000	500	JIS G 0567	
	600						600		
	700						700		

Table 2.6 内圧クリーブ破断試験条件

	Temperature	Hoop stress	Rupture time	Sodium velocity	Oxygen level	CT temp.
	°C	MPa	h	m/s	ppm	°C
In-sodium	600	250-380	~22,300	<0.01	1-2.5	120-145
	650	110-400	~14,500			
	675	125-280	~17,200			
	700	70-250	~17,400			
In-air	600	360-470	~2,750	-	-	-
	650	200-335	~5,000			
	675	135-260	~23,200			
	700	95-315	~20,000			
	750	90-240	~2,700			

Table 4.1 酸素濃度依存性に関する報告[3]

Bibliography	O ₂ content	Coefficient
	ppm	n
Thorley	5-100	1.5
Zebroski	12, 50	1, 1.56
Roy	5-30	1.2
Kolster	1-8	0.91
	8-40	>1
Maruyama	2.5-9	0.8

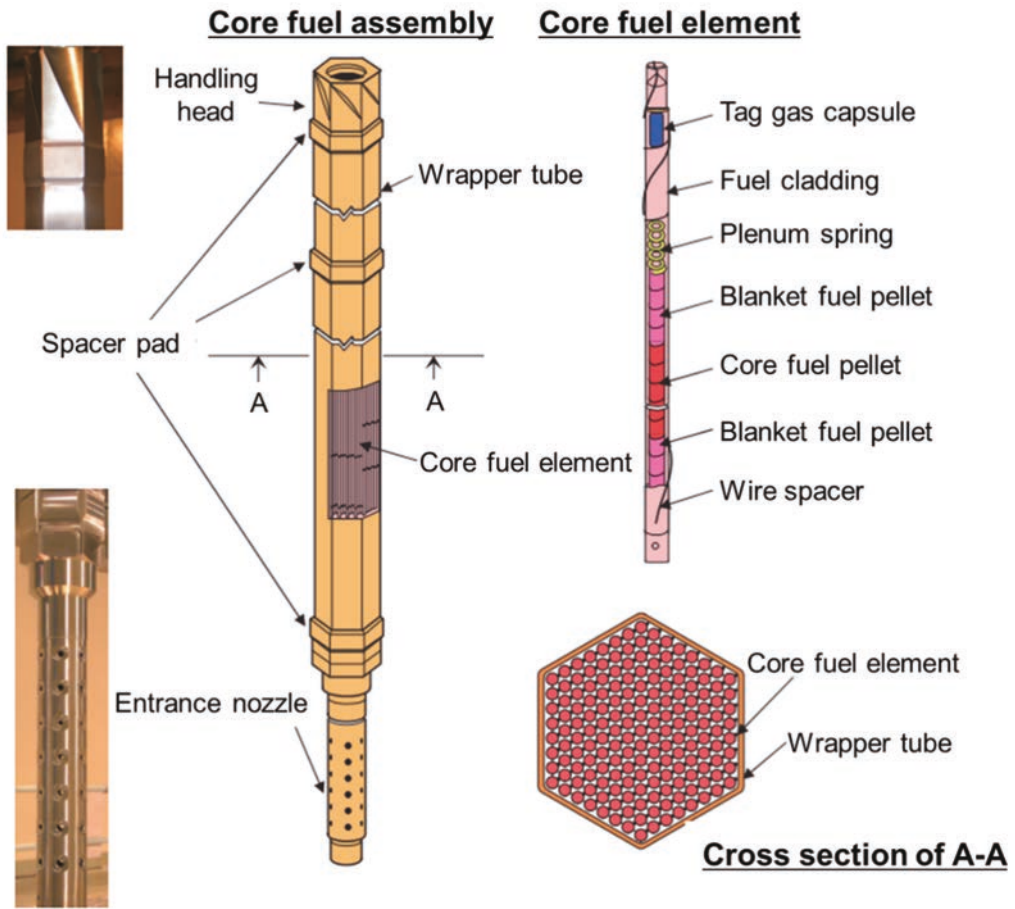


Fig.1.1 高速増殖原型炉「もんじゅ」の炉心燃料集合体の模式図[4]

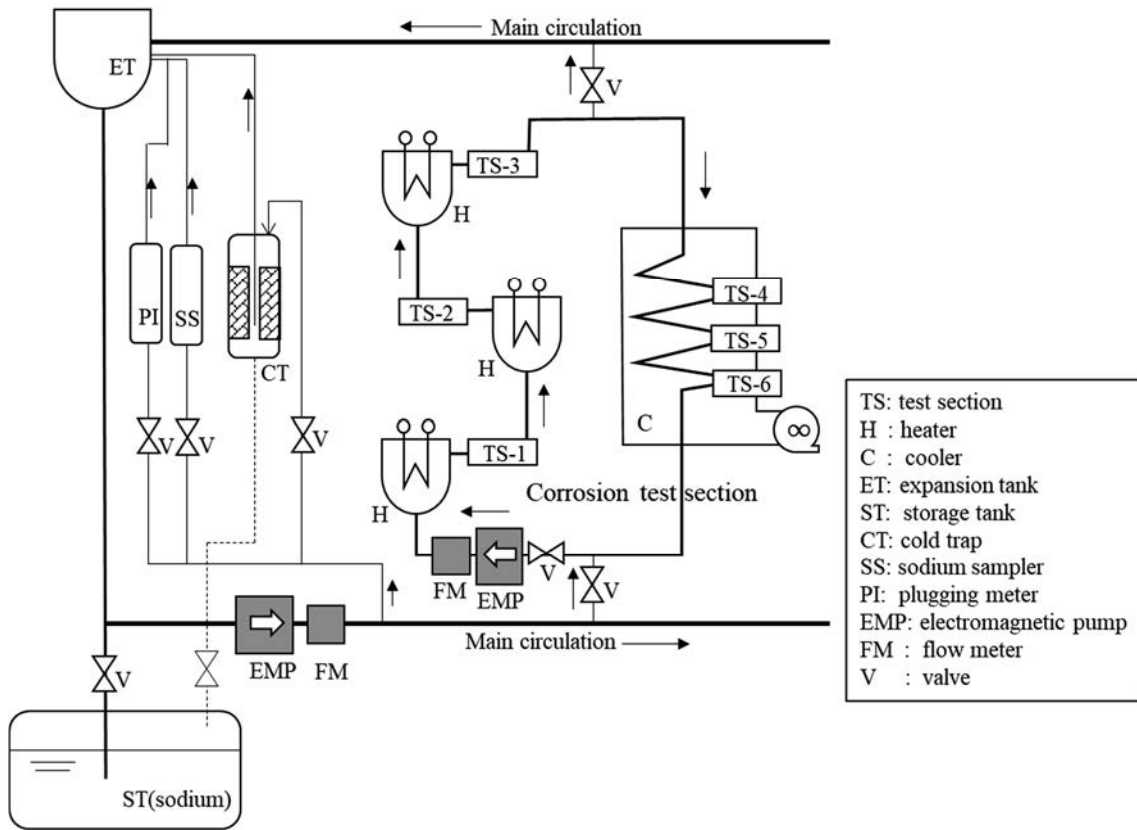


Fig.2.1 材料試験ループ 1 及び 2 のナトリウム中腐食試験部の概略図

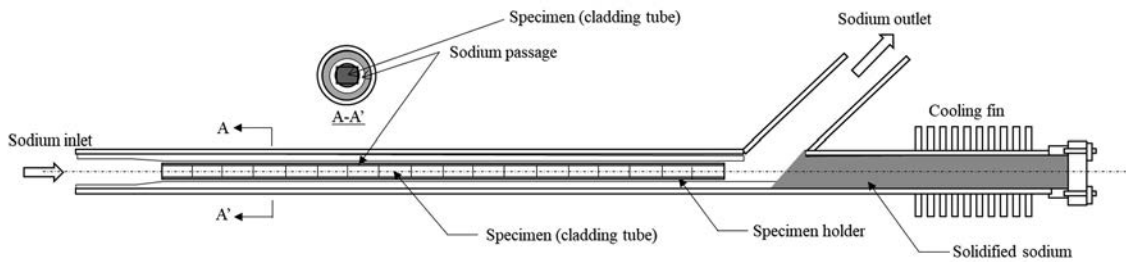


Fig.2.2 腐食試験部の概念図

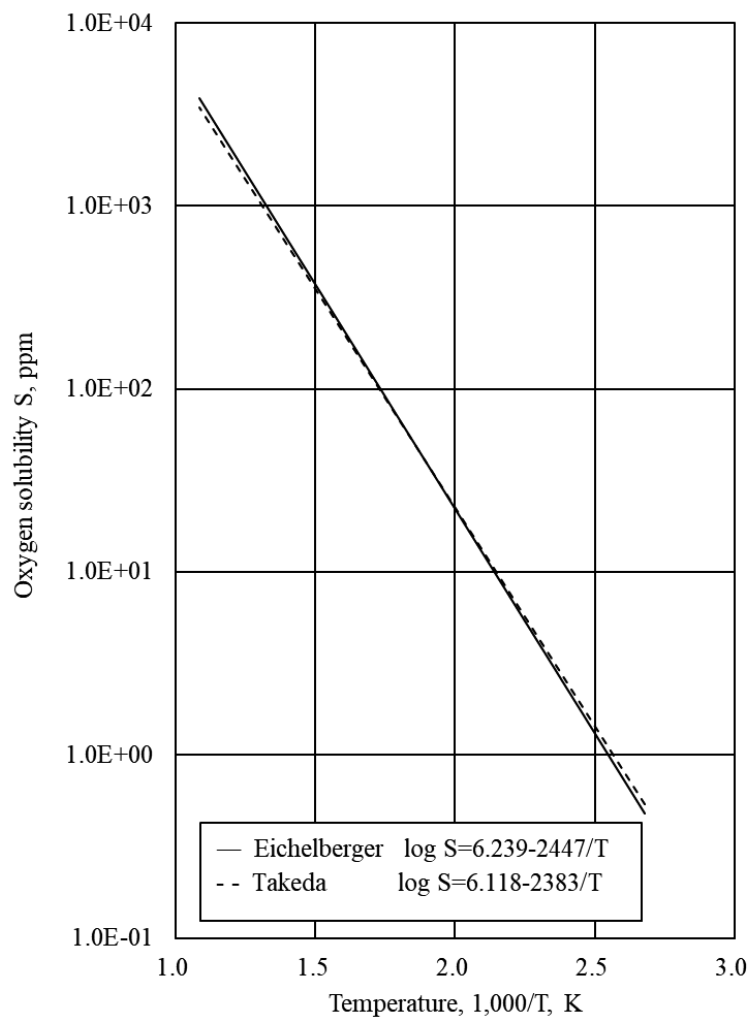


Fig.2.3 ナトリウム中酸素溶解度曲線[10, 11]

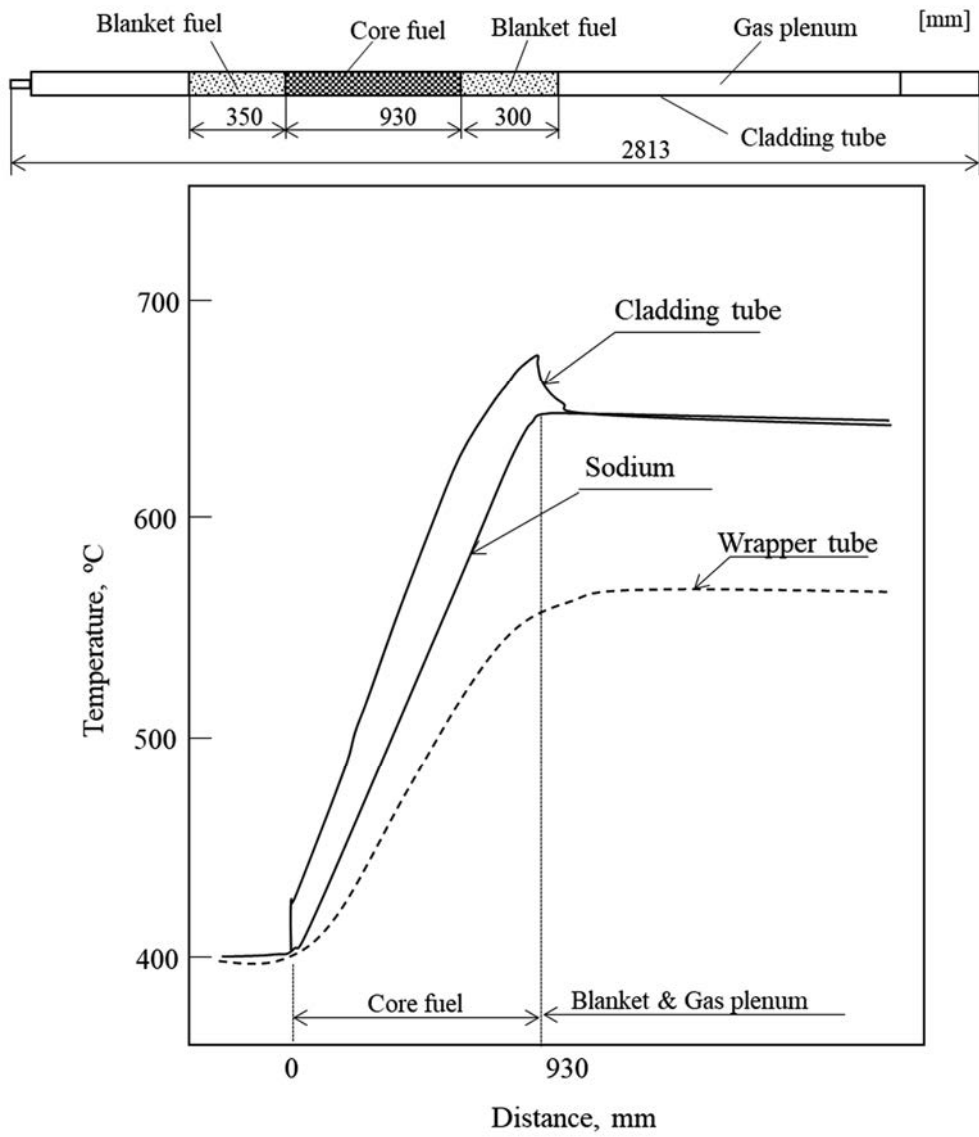


Fig.2.4 「もんじゅ」の炉心における燃料被覆管の軸方向温度分布(例)

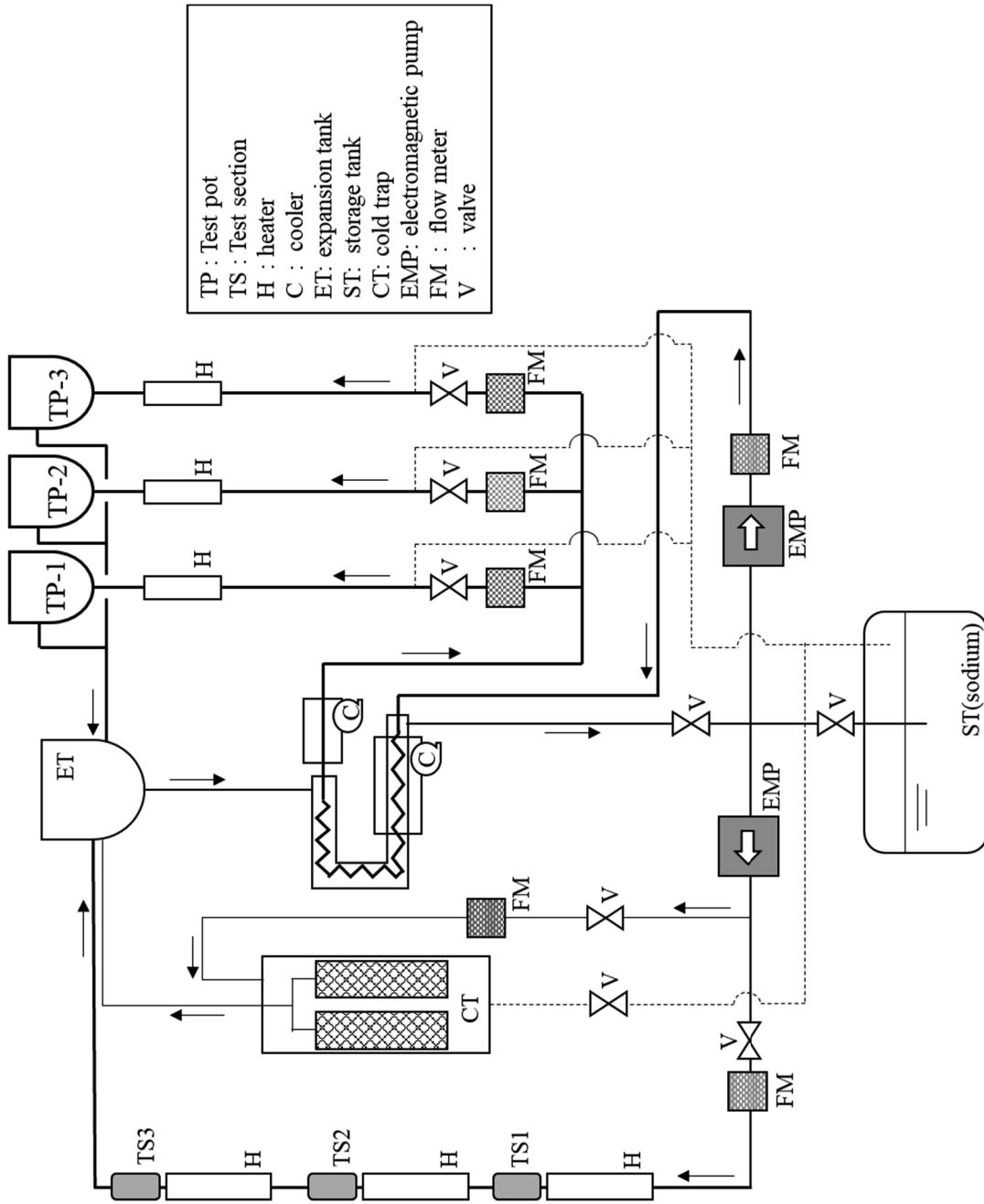


Fig.2.5 熱流束下腐食挙動試験に用いたナトリウム試験ループ系統図

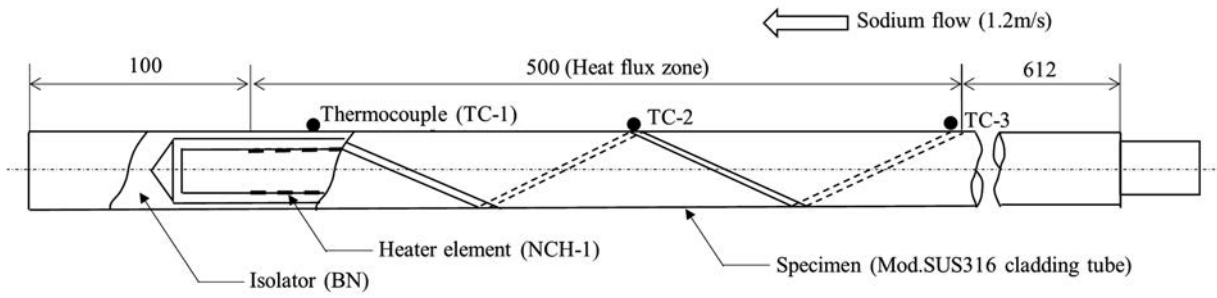


Fig.2.6 ヒーターピン内挿型腐食試験片

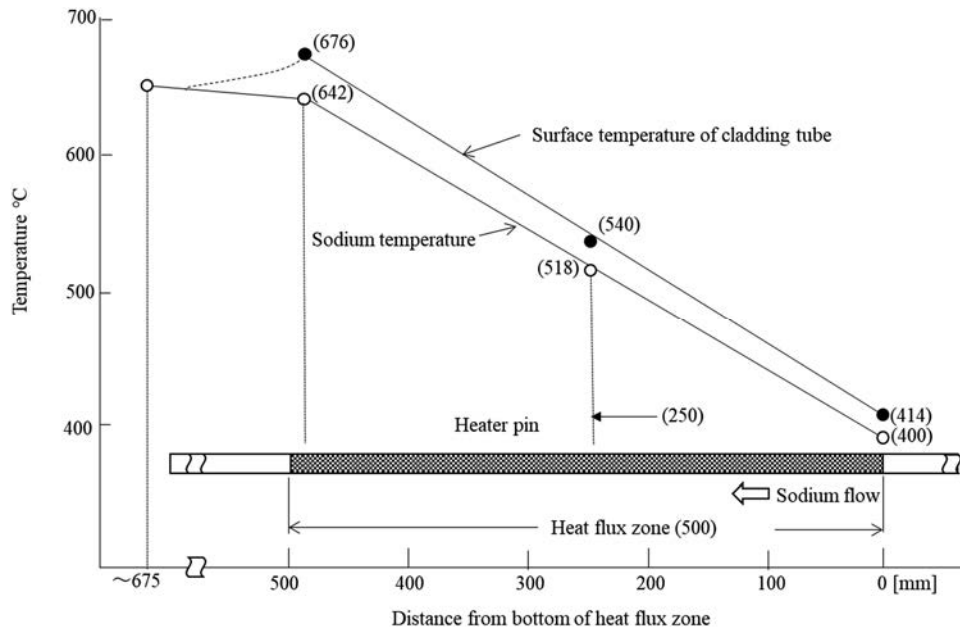
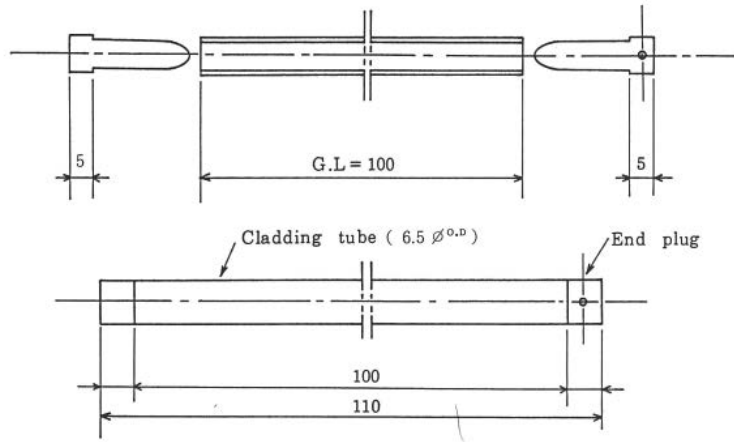
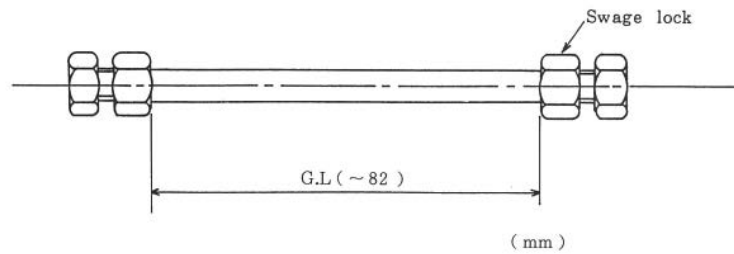


Fig.2.7 高熱流束下腐食試験時における試験片の温度分布



(a)ナトリウム浸漬材及び熱時効材の試験片形状図



(b)引張試験時における治具装着図

Fig.2.8 引張試験片の形状図

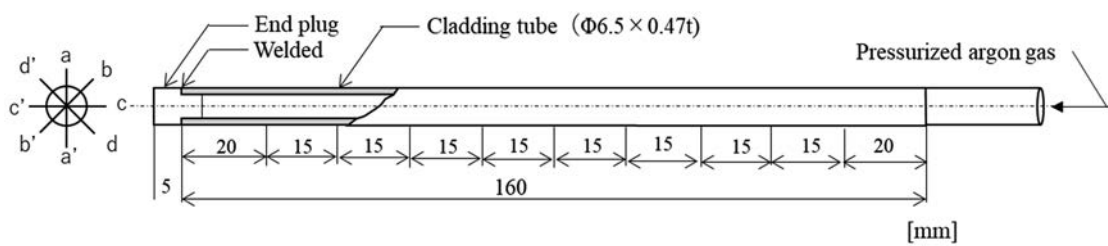


Fig.2.9 内圧クリープ試験片の形状図及び外径変化の測定位置

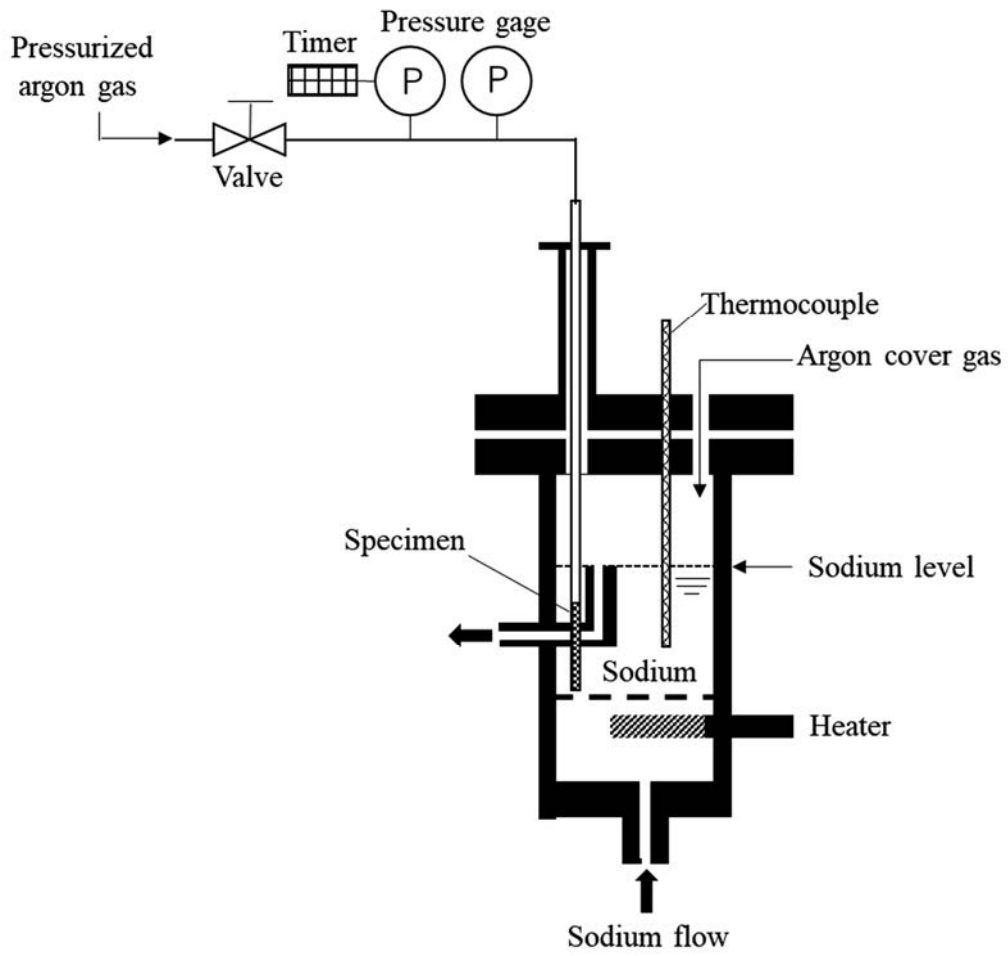
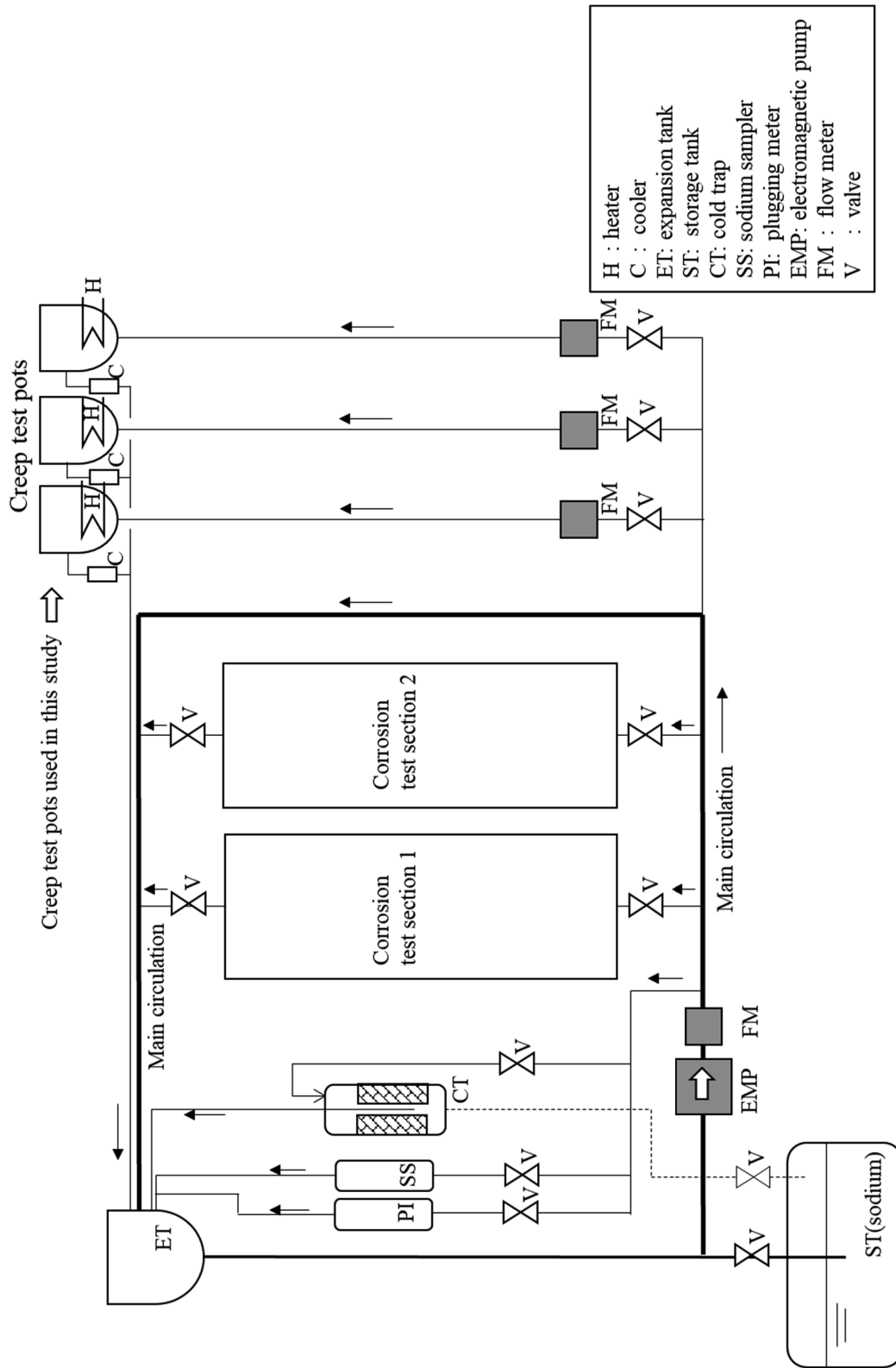


Fig.2.10 ナトリウム中内圧クリープ試験部の概念図



H : heater
 C : cooler
 ET: expansion tank
 ST: storage tank
 CT: cold trap
 SS: sodium sampler
 PI: plugging meter
 EMP: electromagnetic pump
 FM : flow meter
 V : valve

Fig.2.11 ナトリウム中内圧クリープ試験に用いた材料試験ループ系統図

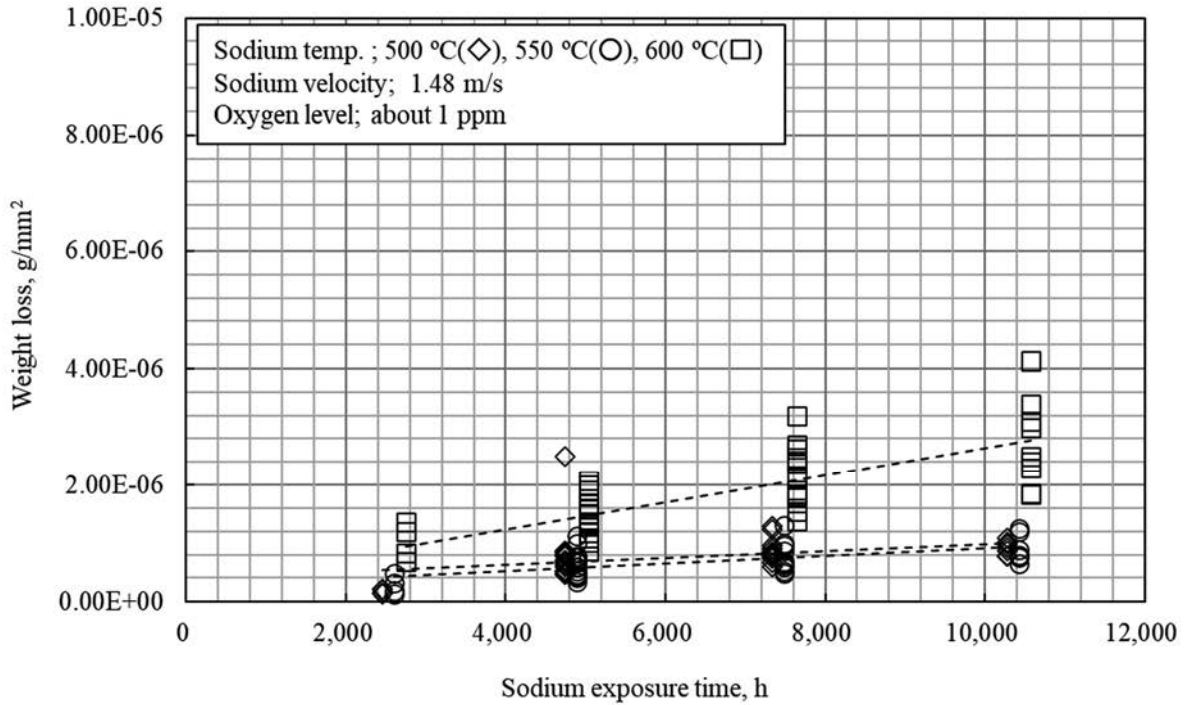


Fig.3.1 重量損失量と腐食時間との関係(500-600 °C, 1.48 m/s)

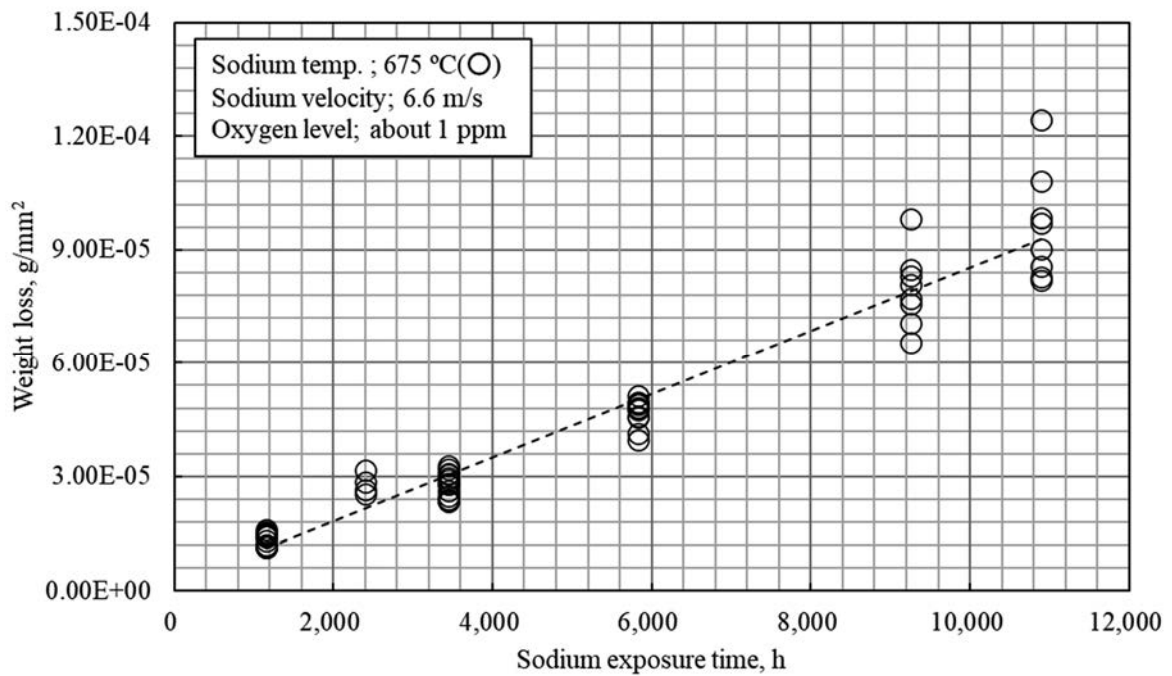


Fig.3.2 重量損失量と腐食時間との関係(675 °C, 6.6 m/s)

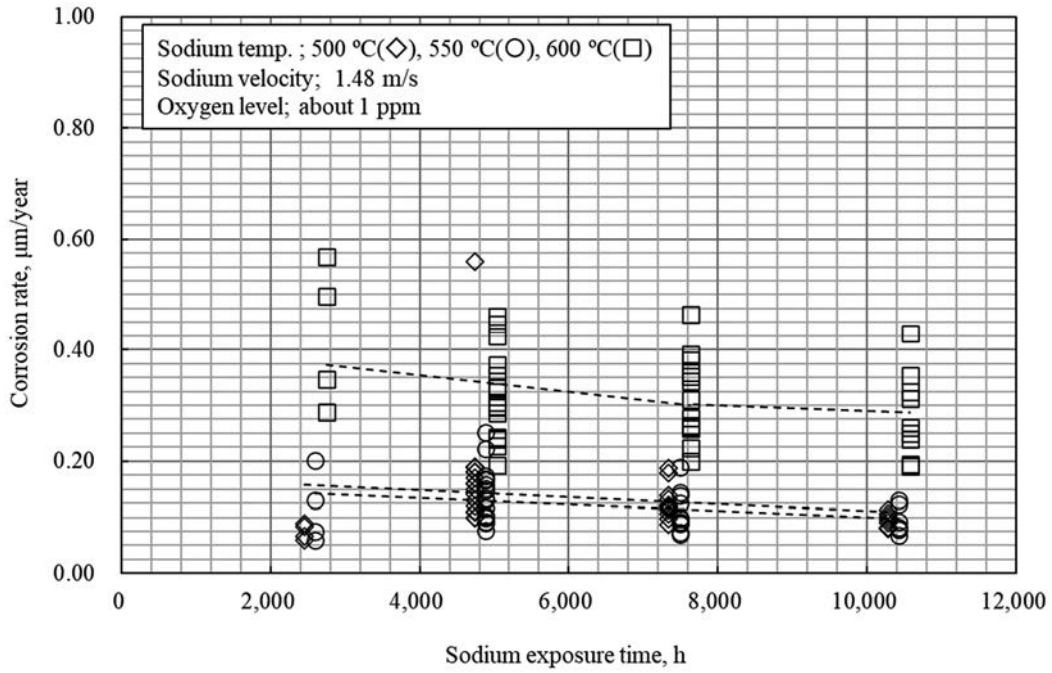


Fig.3.3 腐食速度と腐食時間との関係(500-600 °C, 1.48 m/s)

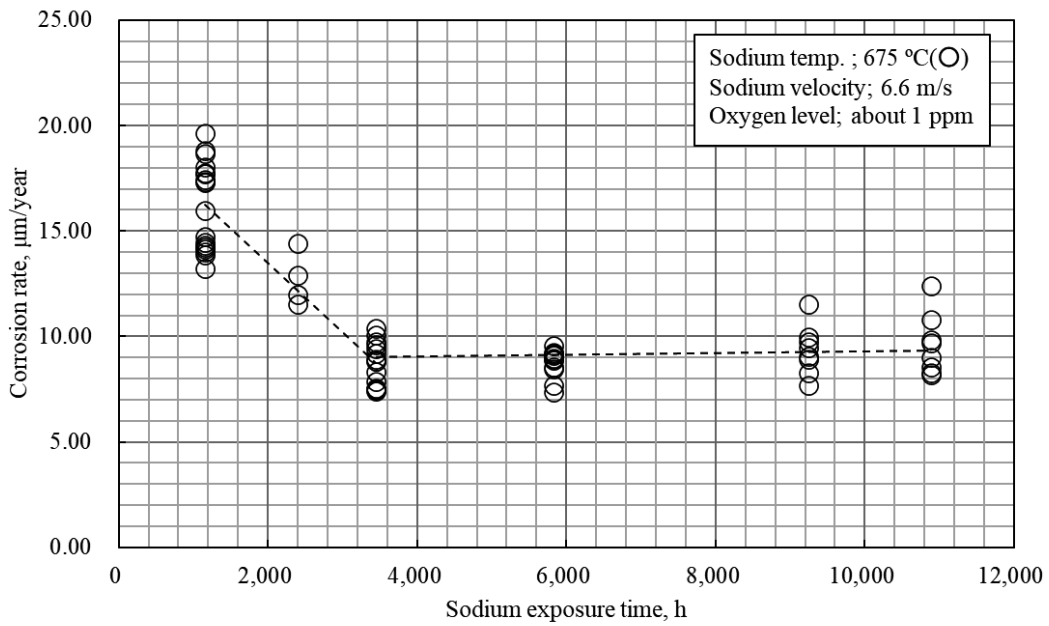


Fig.3.4 腐食速度と腐食時間との関係(675 °C, 6.6 m/s)

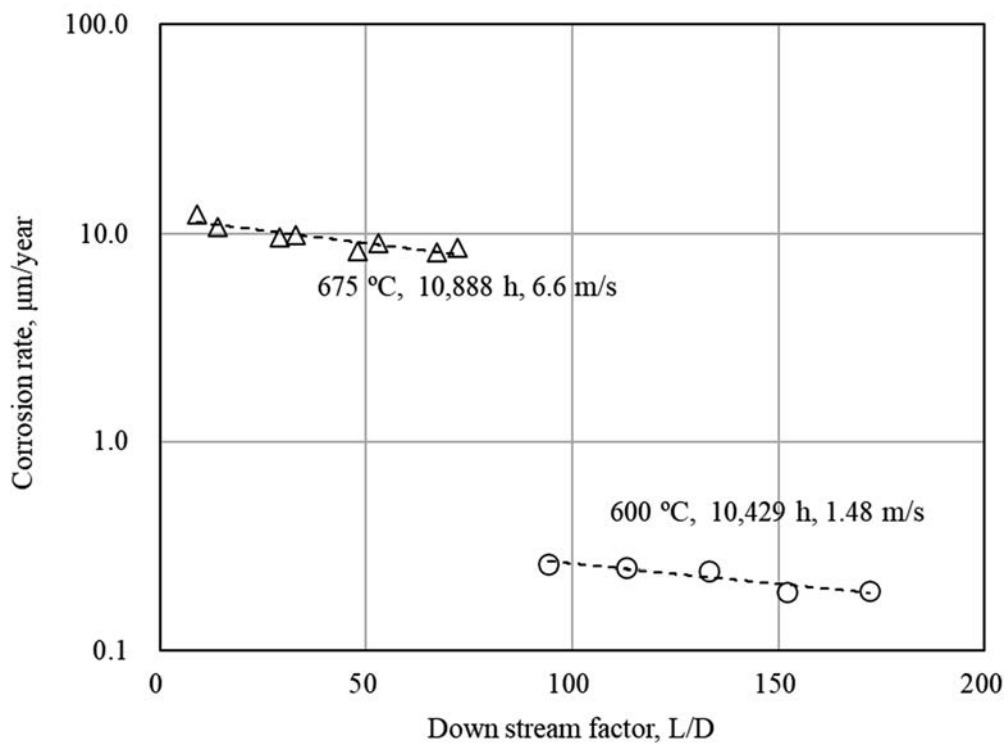
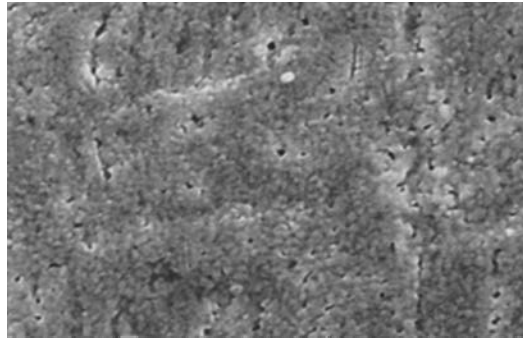
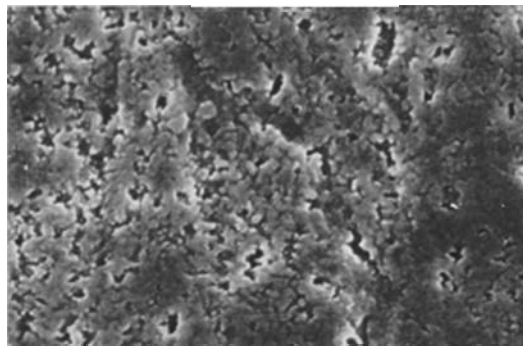


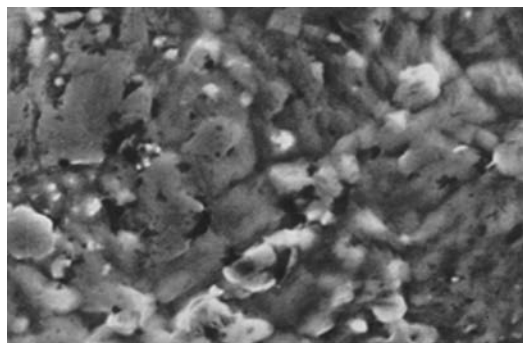
Fig.3.5 腐食速度と下流位置との関係



(a) 500 °C



(b) 550 °C



(c) 600 °C

10 μ m

腐食時間：10,429 h
ナトリウム流速：1.48 m/s
酸素濃度：約 1 ppm

Fig.3.6 各温度における腐食試験後の表面形態

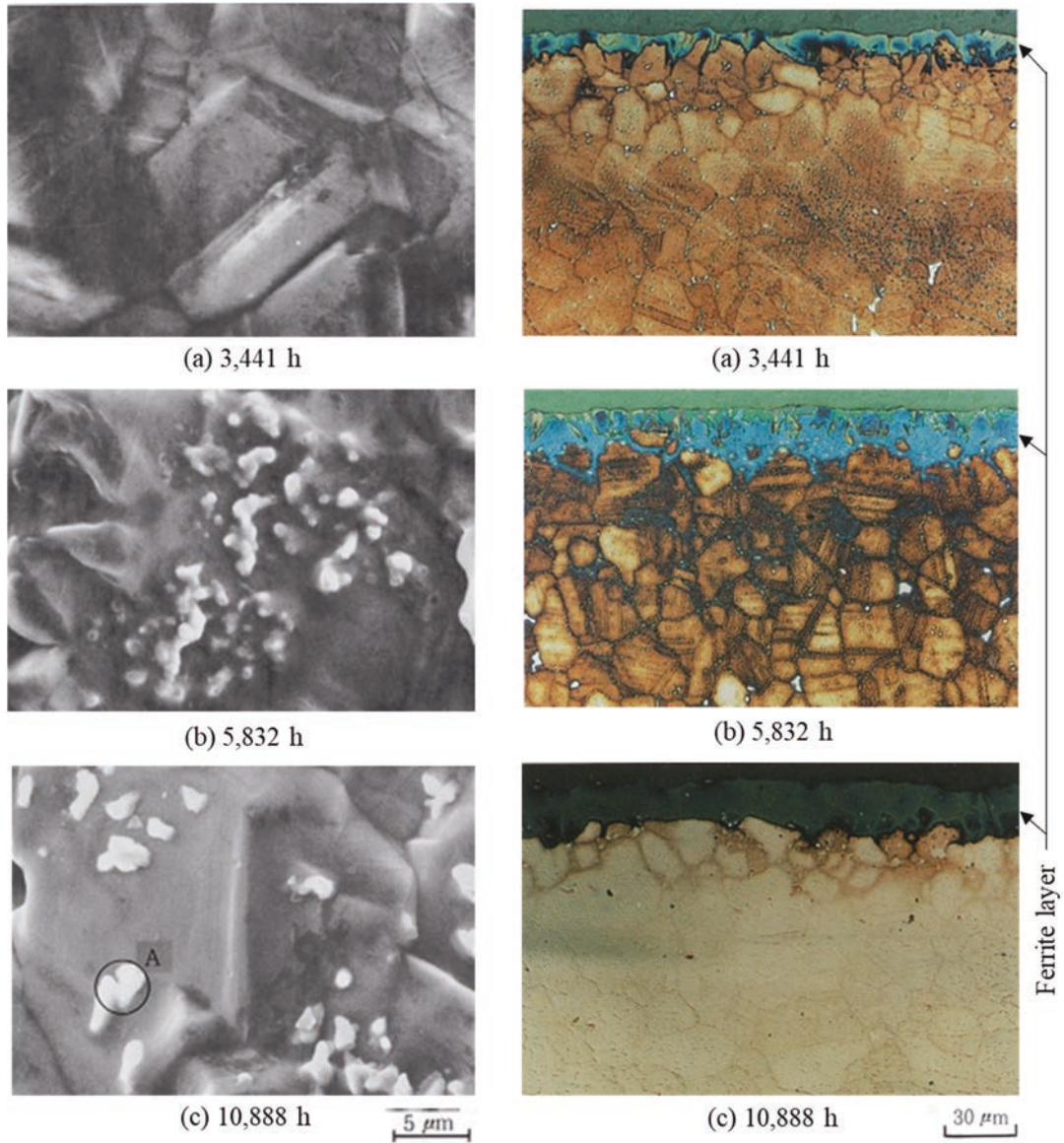


Fig.3.7 腐食時間に伴う表面腐食形態及び断面組織
 [ナトリウム温度：675 °C, ナトリウム流速：6.6 m/s, 酸素濃度：約 1 ppm]

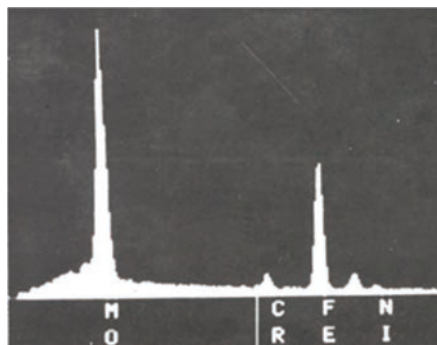


Fig.3.8 A 位置での EDS 分析結果

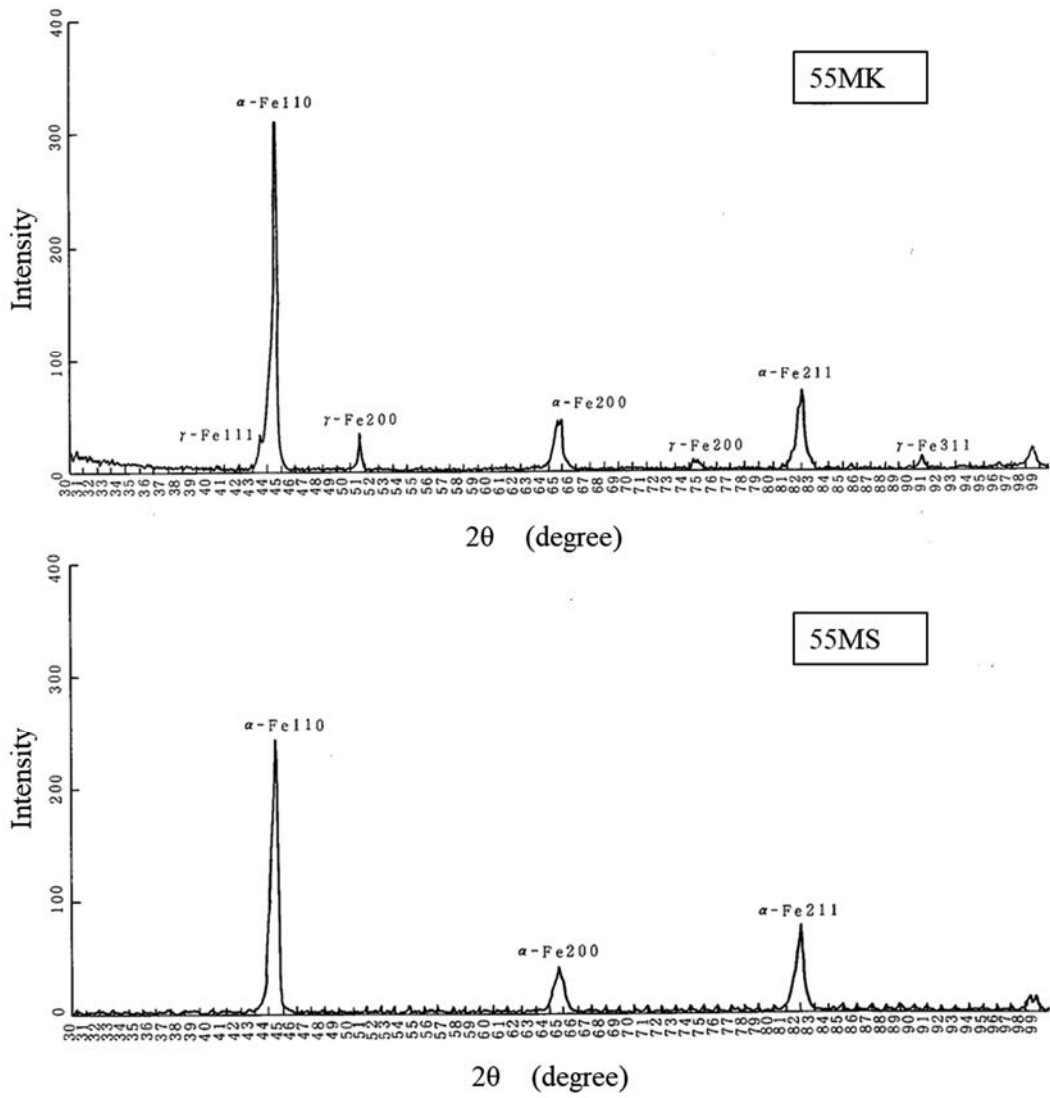


Fig.3.9 表面変質層の X 線回折結果

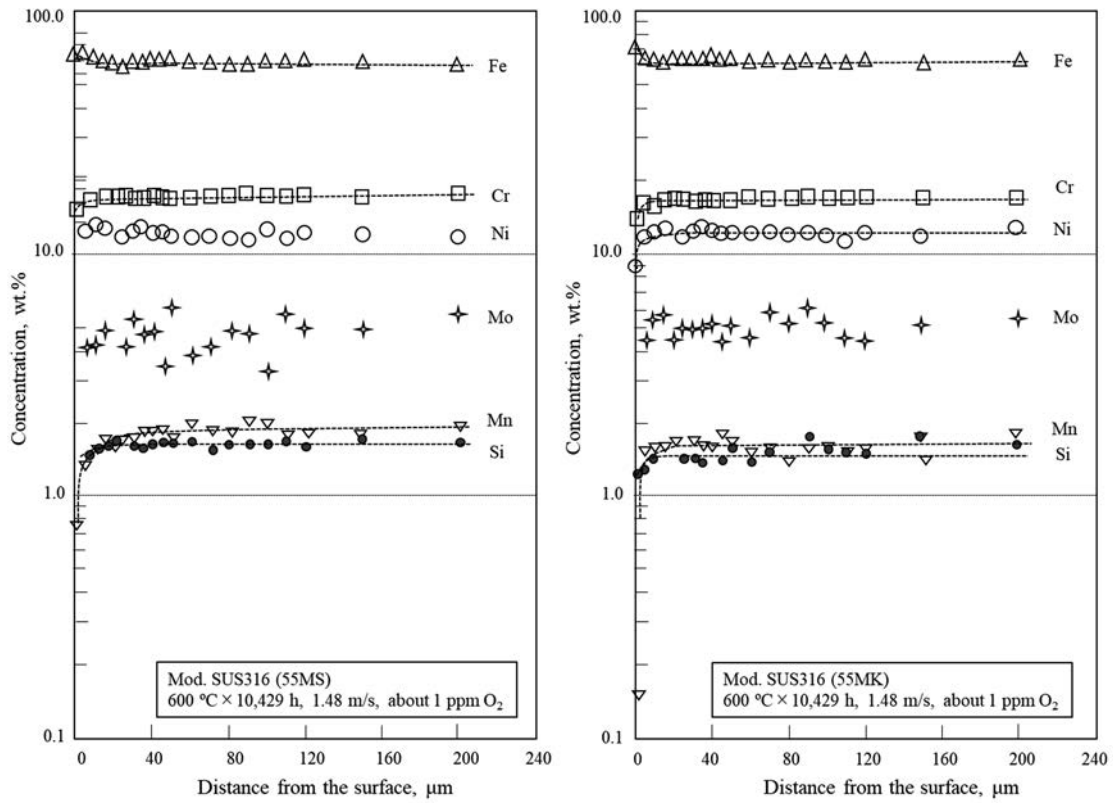


Fig.3.10 ナトリウム接液面からの深さ方向の合金組成の変化(600 °C×10,429 h)

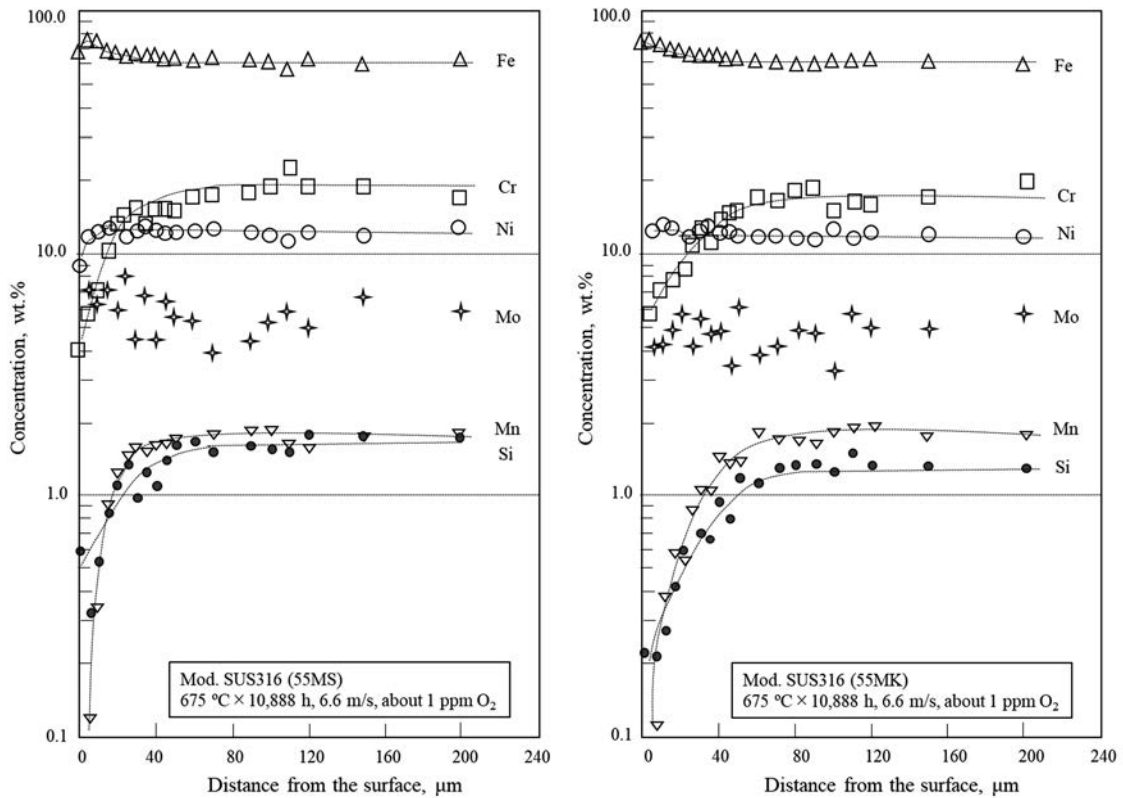


Fig.3.11 ナトリウム接液面からの深さ方向の化学組成の変化(675 °C×10,888 h)

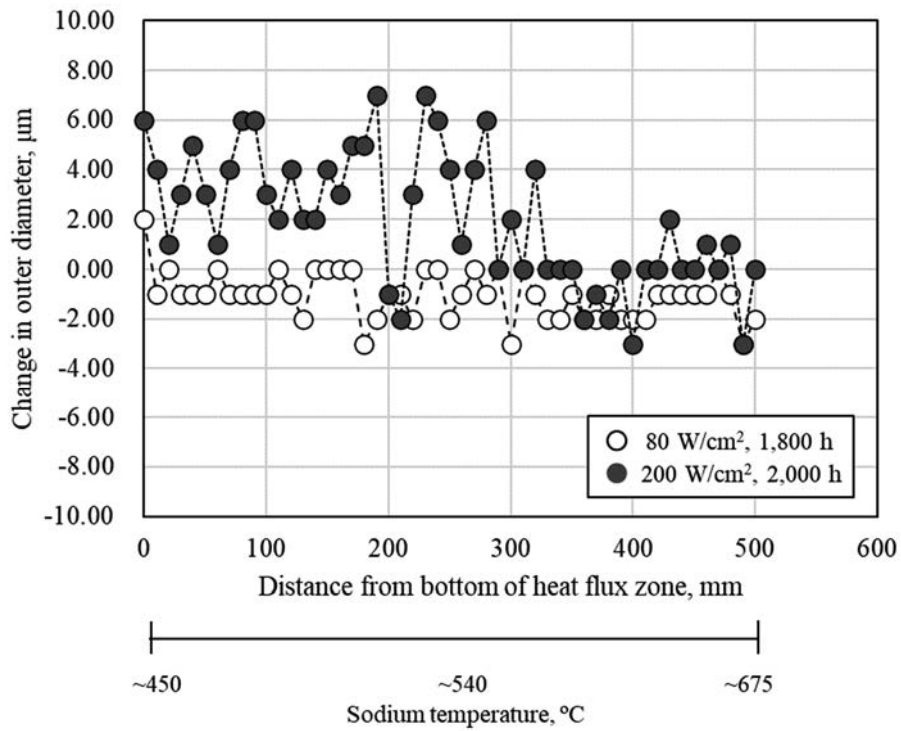


Fig.3.12 熱流束下腐食挙動試験後の被覆管外径の変化

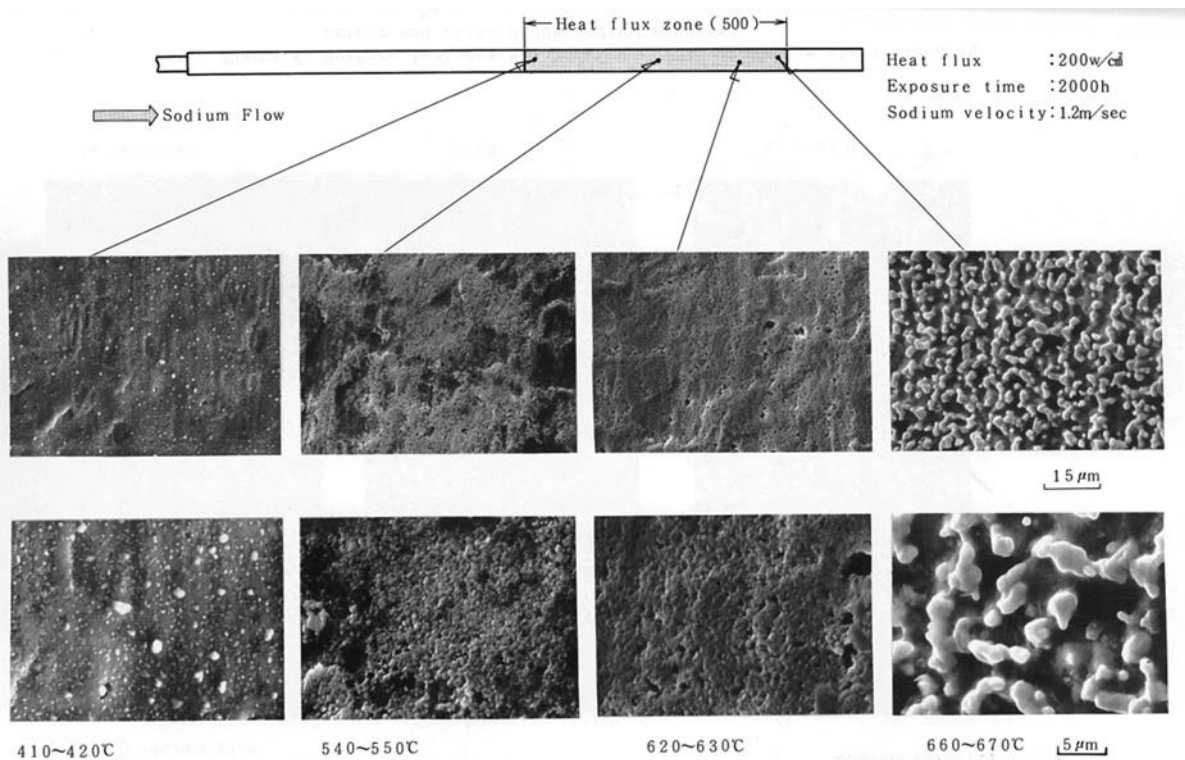


Fig.3.13 熱流束を伴う燃料被覆管の表面腐食形態(200 W/cm²)

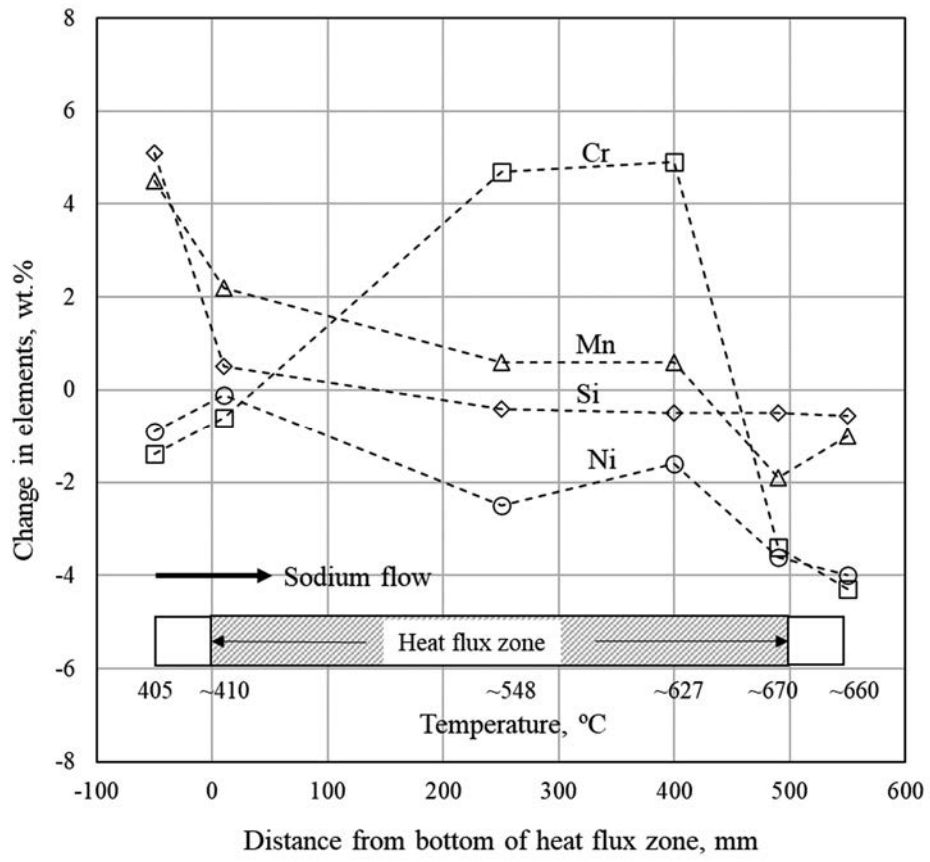


Fig.3.14 熱流束を伴う燃料被覆管の表面組成変化(200 W/cm²)

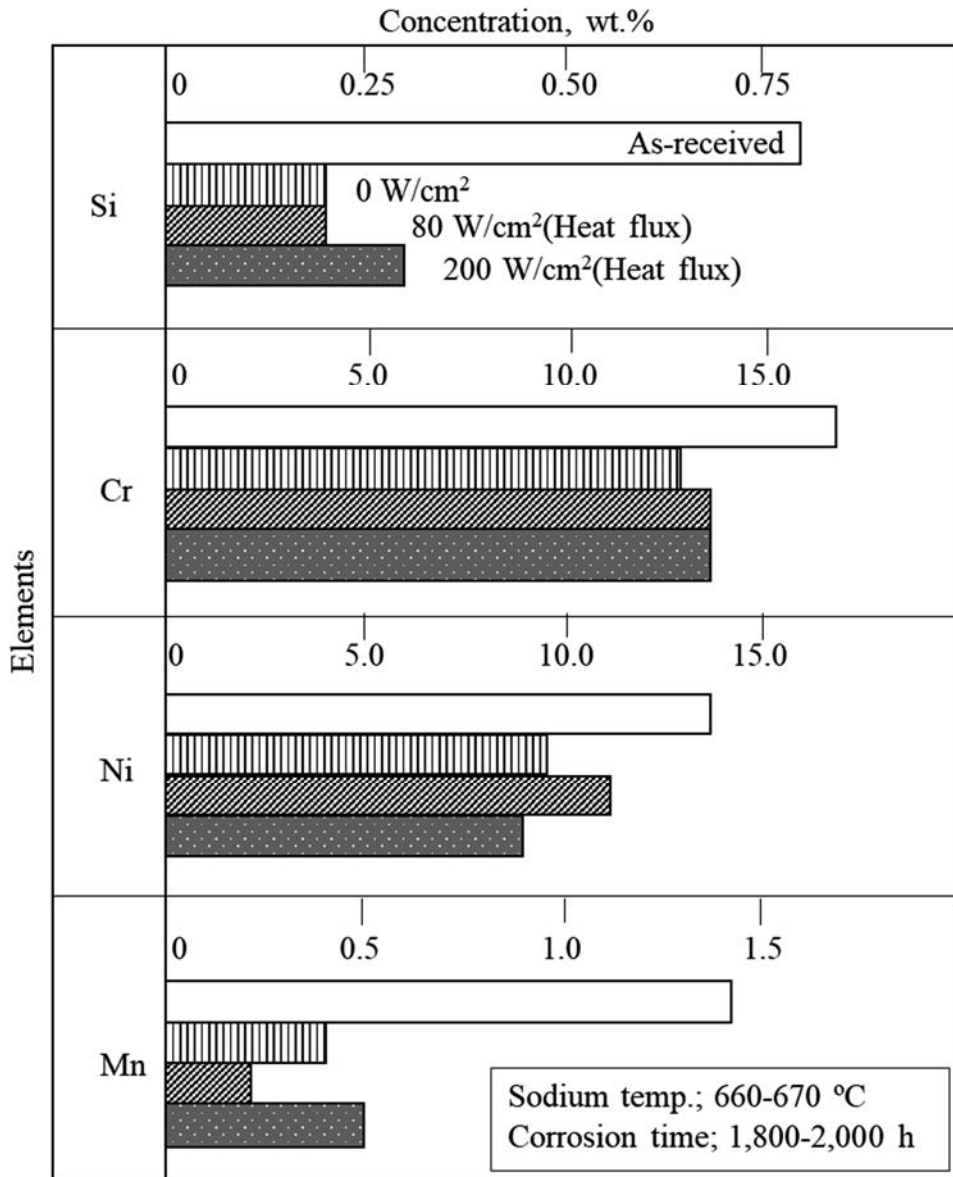


Fig.3.15 表面濃度変化に及ぼす熱流束の影響

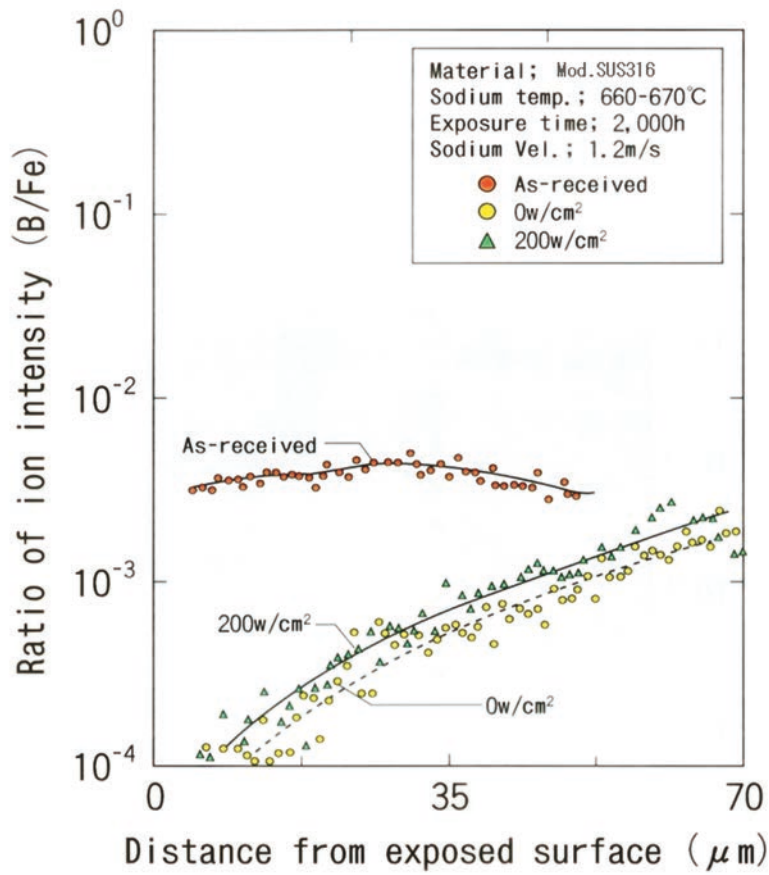


Fig.3.16 燃料被覆管肉厚方向におけるホウ素濃度の変化

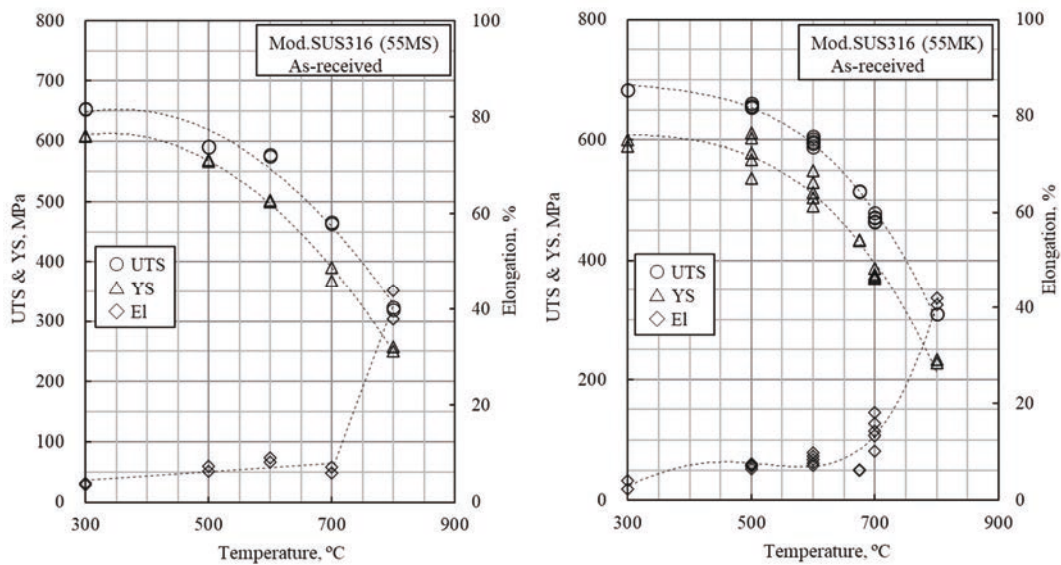


Fig.3.17 受入材の引張特性

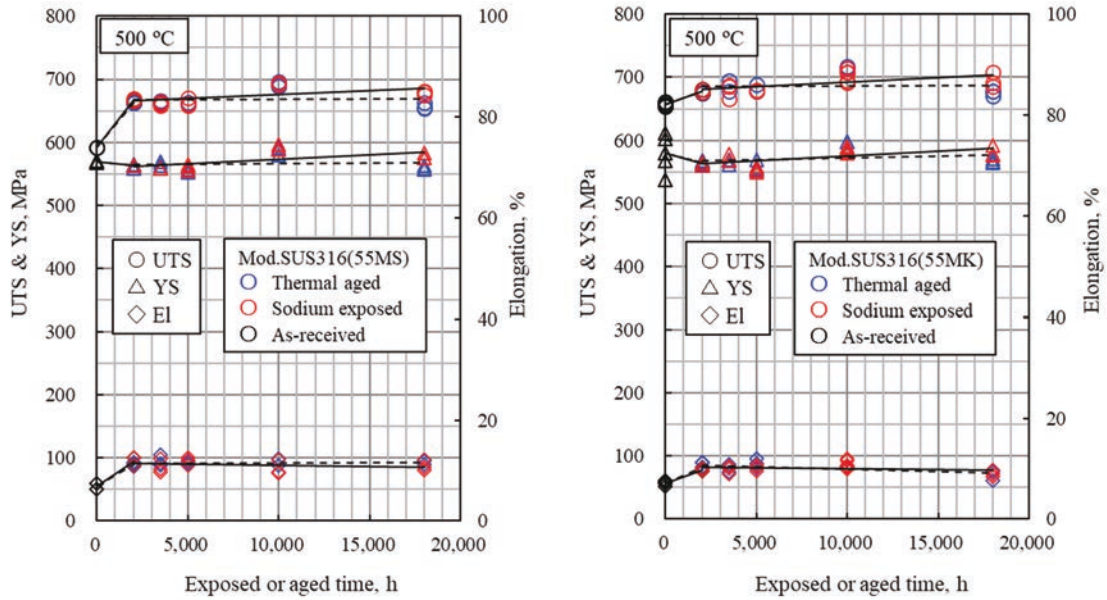


Fig.3.18 ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(500 °C)

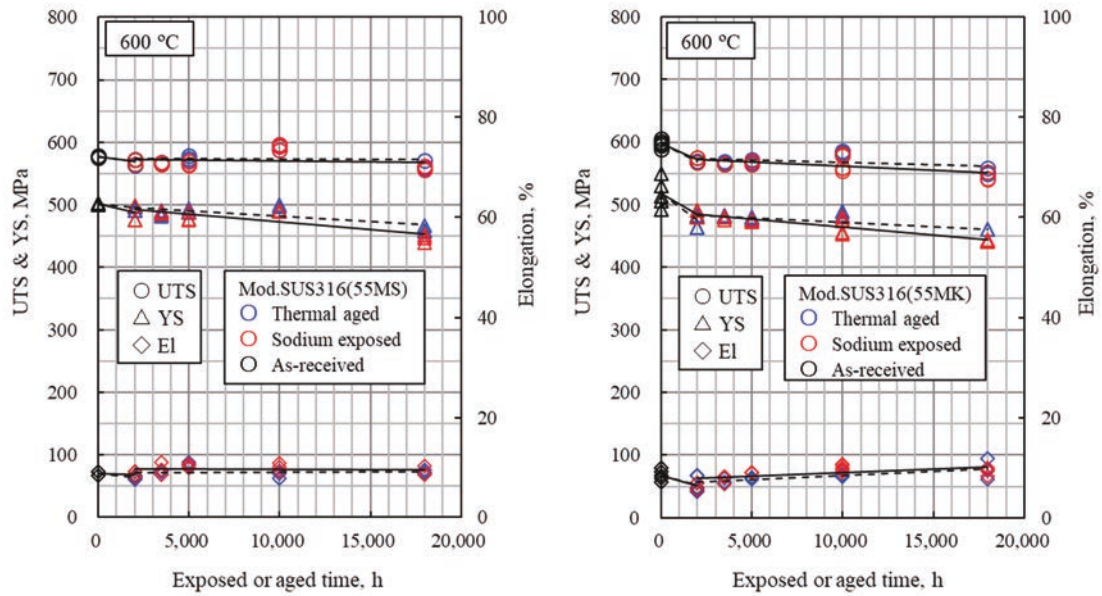


Fig.3.19 ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(600 °C)

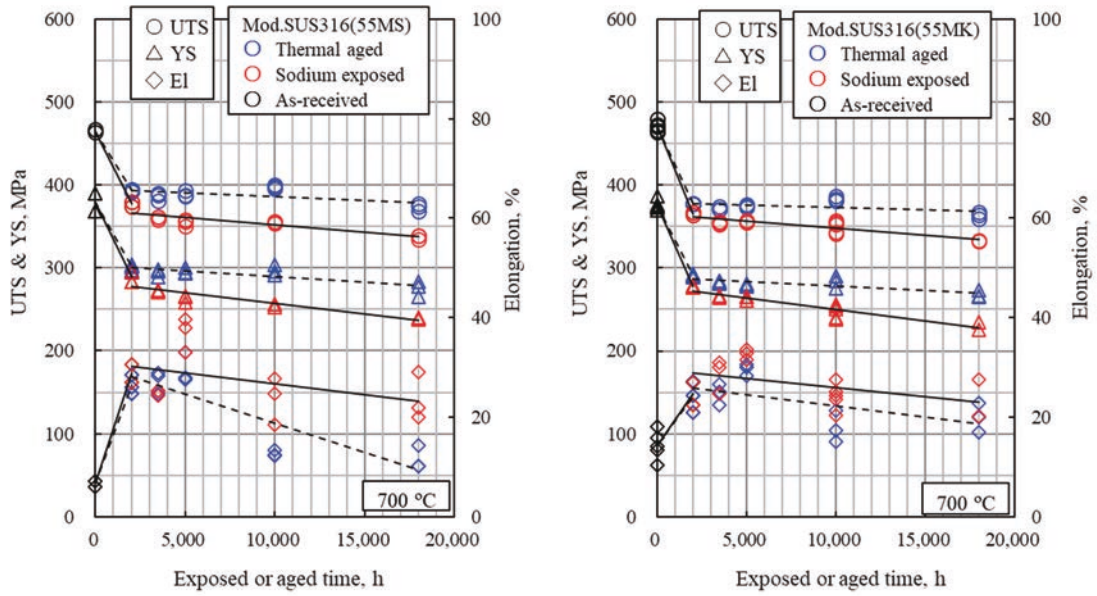


Fig.3.20 ナトリウム浸漬材と熱時効材の引張特性(700 °C)

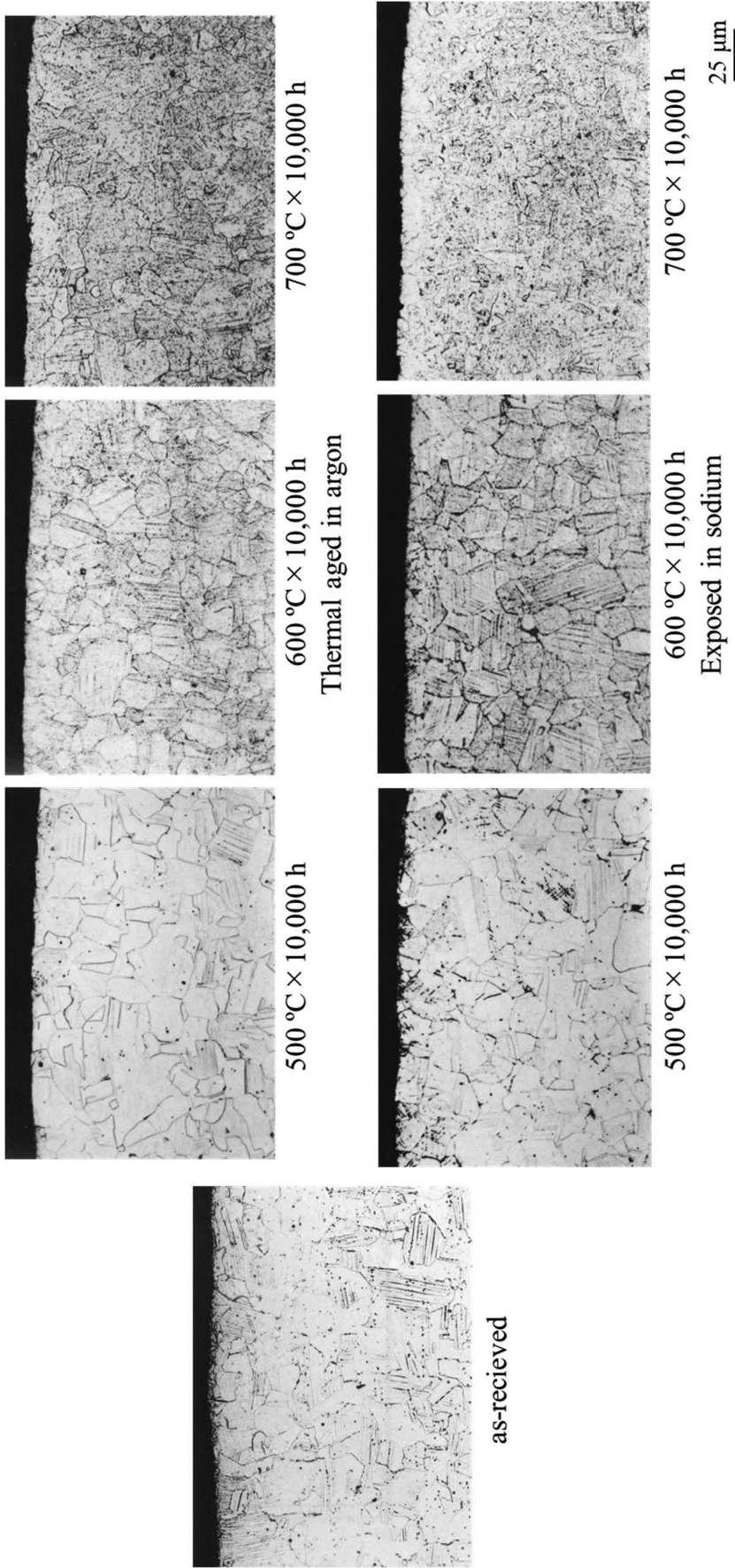


Fig.3.21 受入材、熱時効材及びびトリウム浸漬材の断面組織
(写真上部が燃料被覆管外面側)

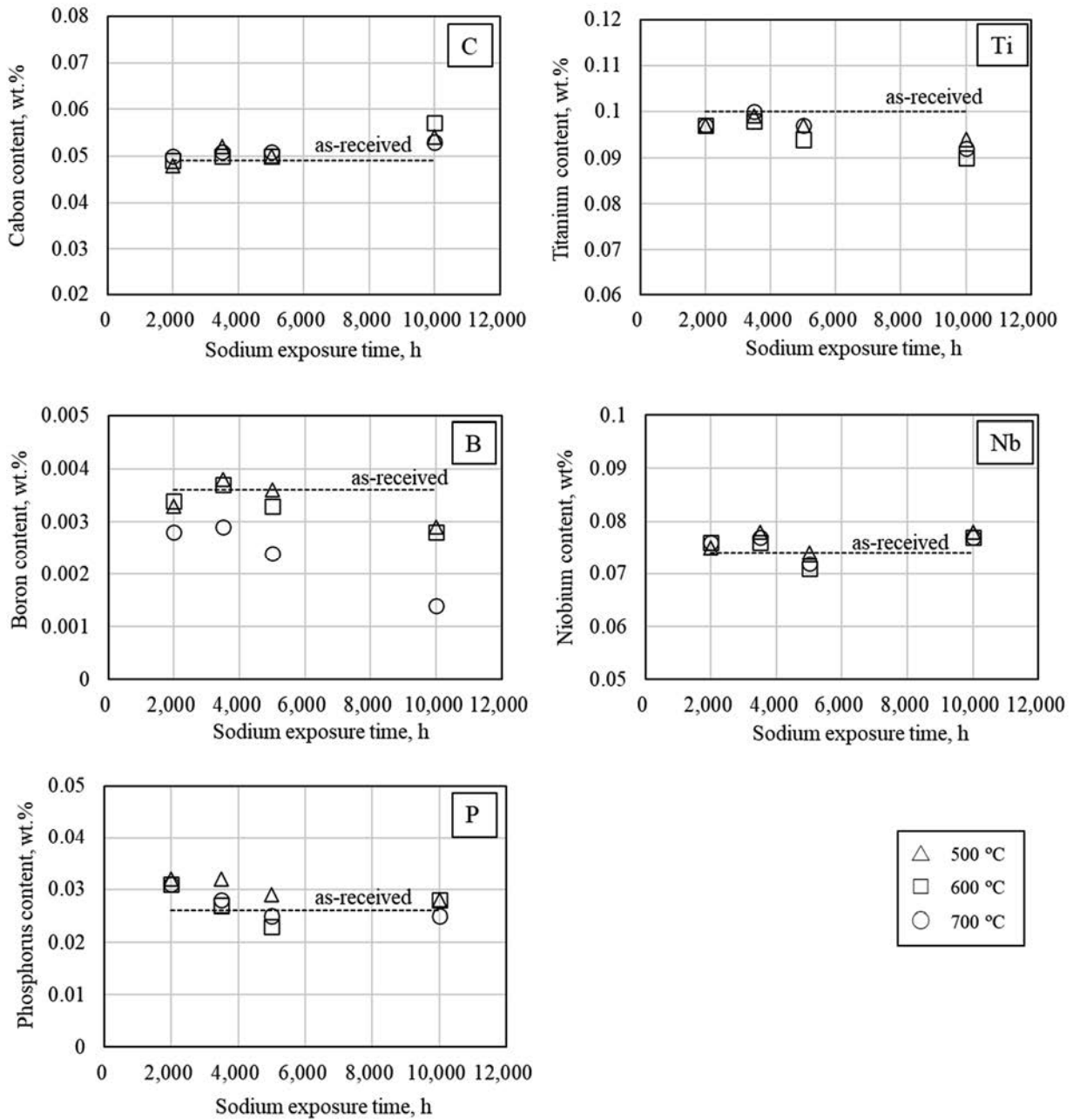


Fig.3.22 ナトリウム浸漬後における C, B, P, Ti, Nb のバルク濃度変化(55MS)

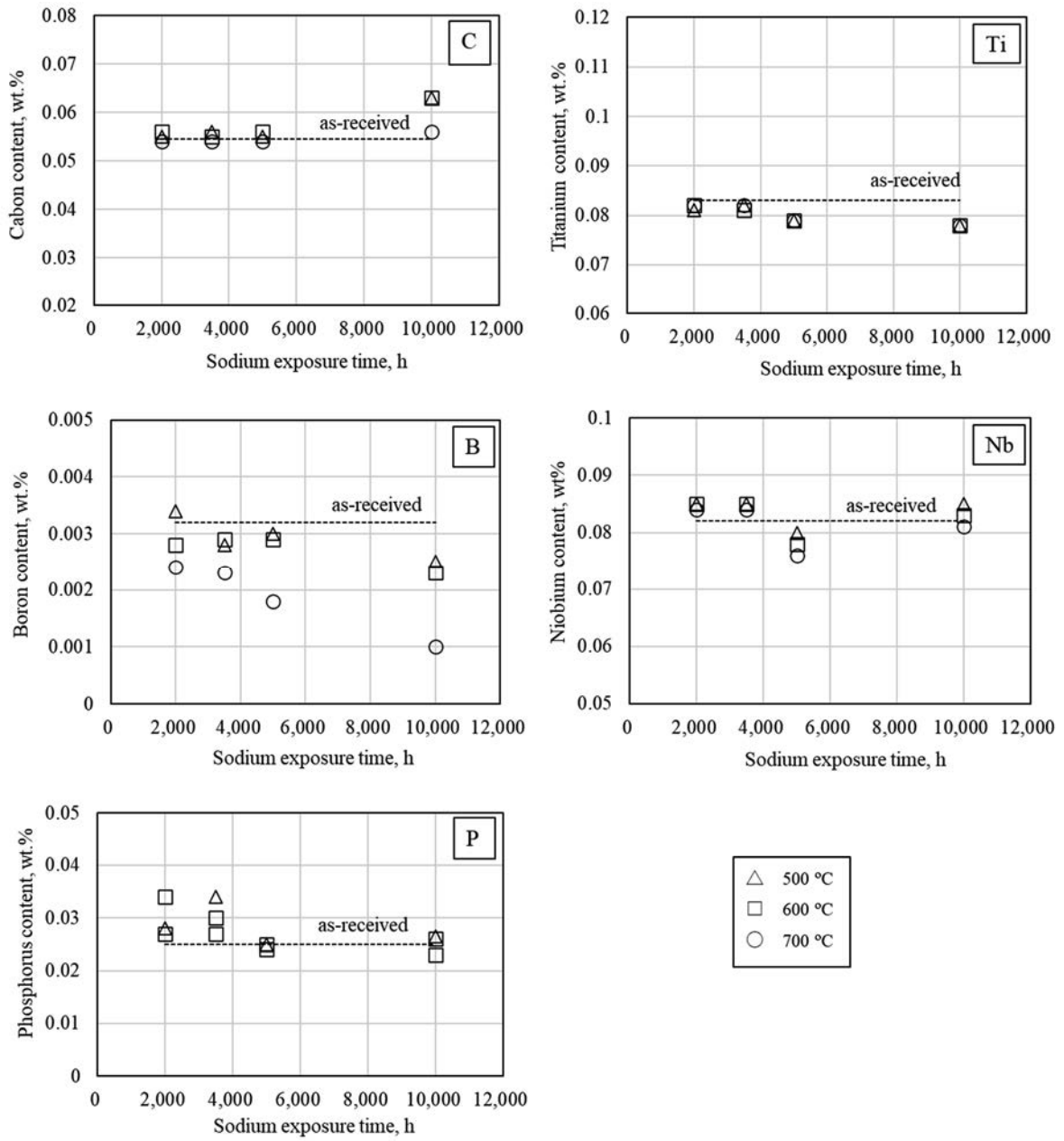


Fig.3.23 ナトリウム浸漬後における C, B, P, Ti, Nb のバルク濃度変化(55MK)

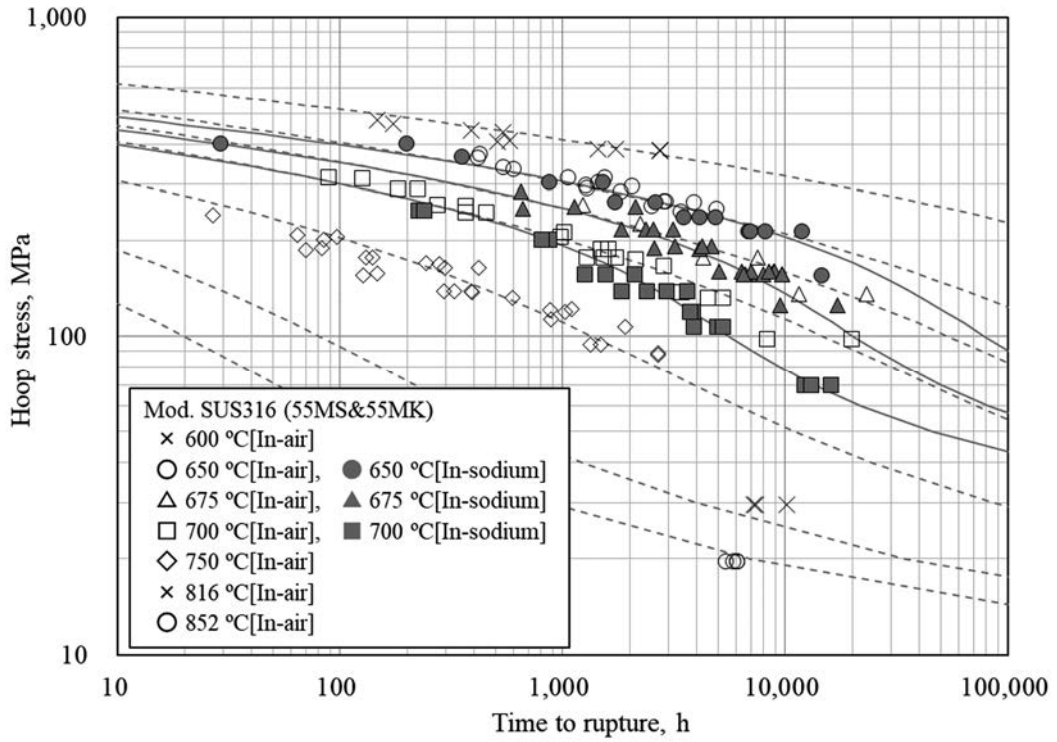


Fig.3.24 大気中及びナトリウム中内圧クリープ破断特性(55MS&55MK)

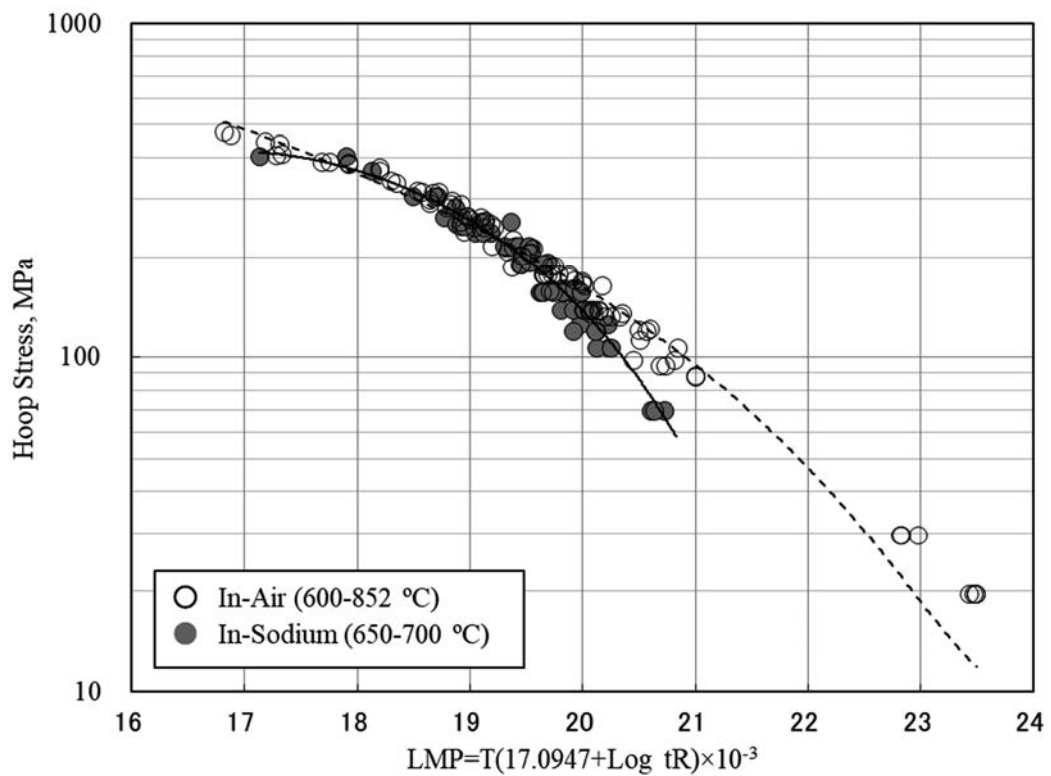


Fig.3.25 Larson-Miller パラメータ法による整理

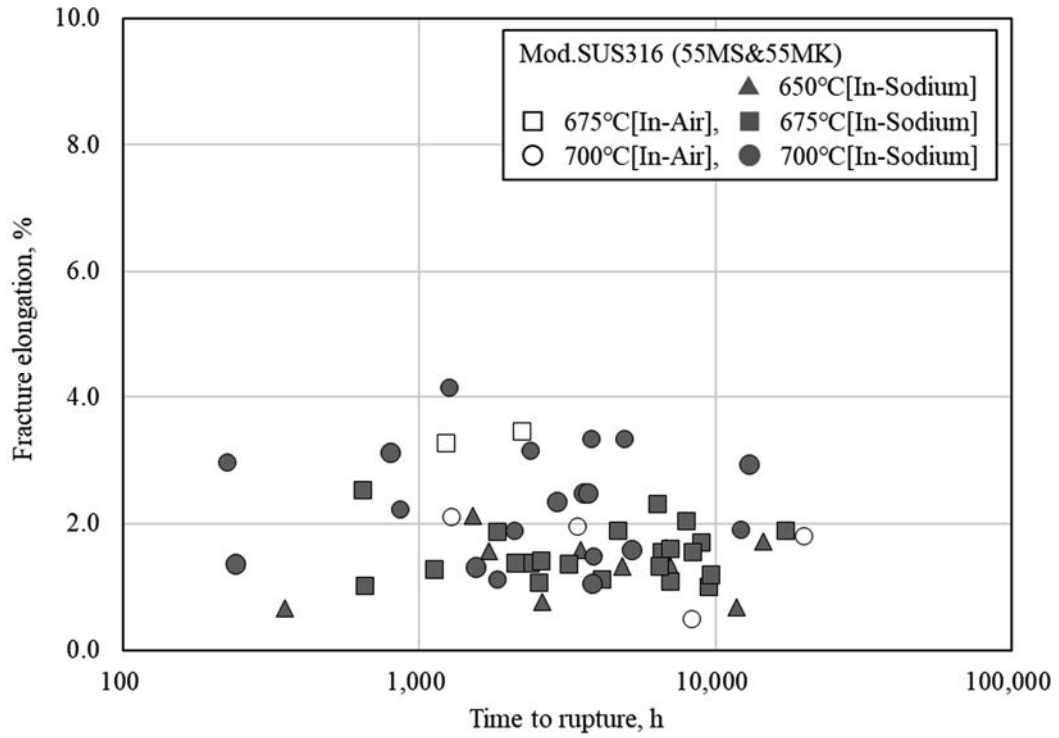


Fig.3.26 内圧クリープ破断伸び(55MS&55MK)

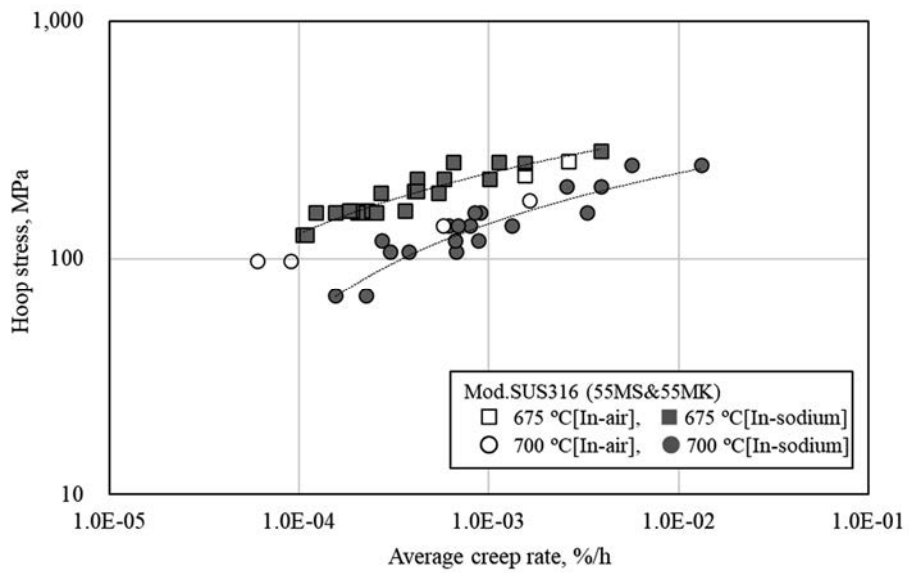


Fig.3.27 平均クリープ速度(55MS&55MK)

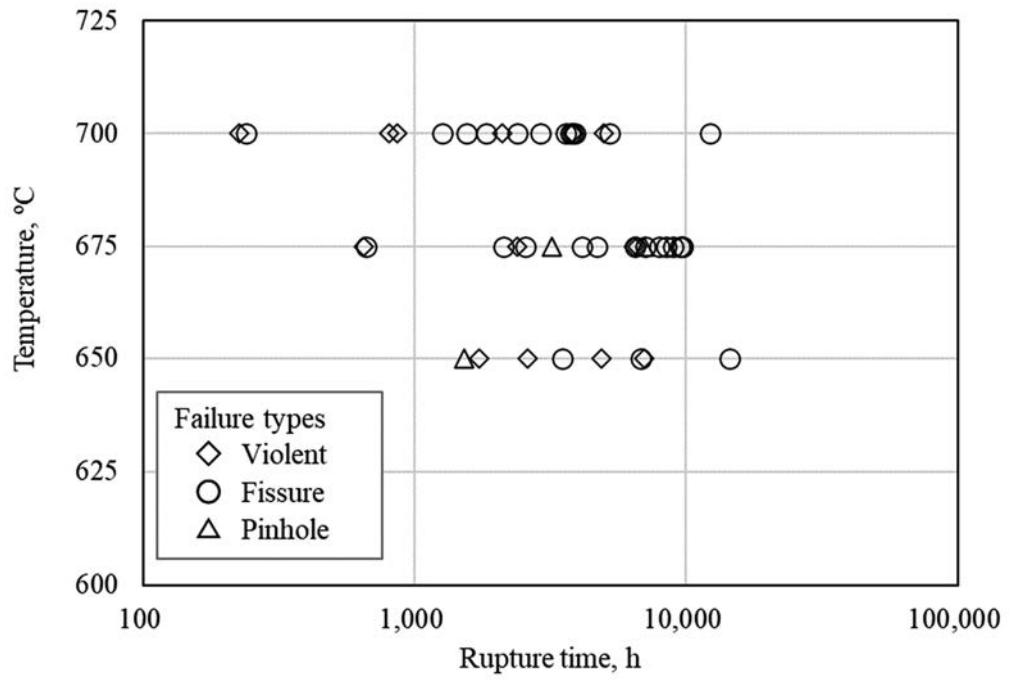


Fig.3.28 ナトリウム環境下における内圧クリープ破損形態の分類

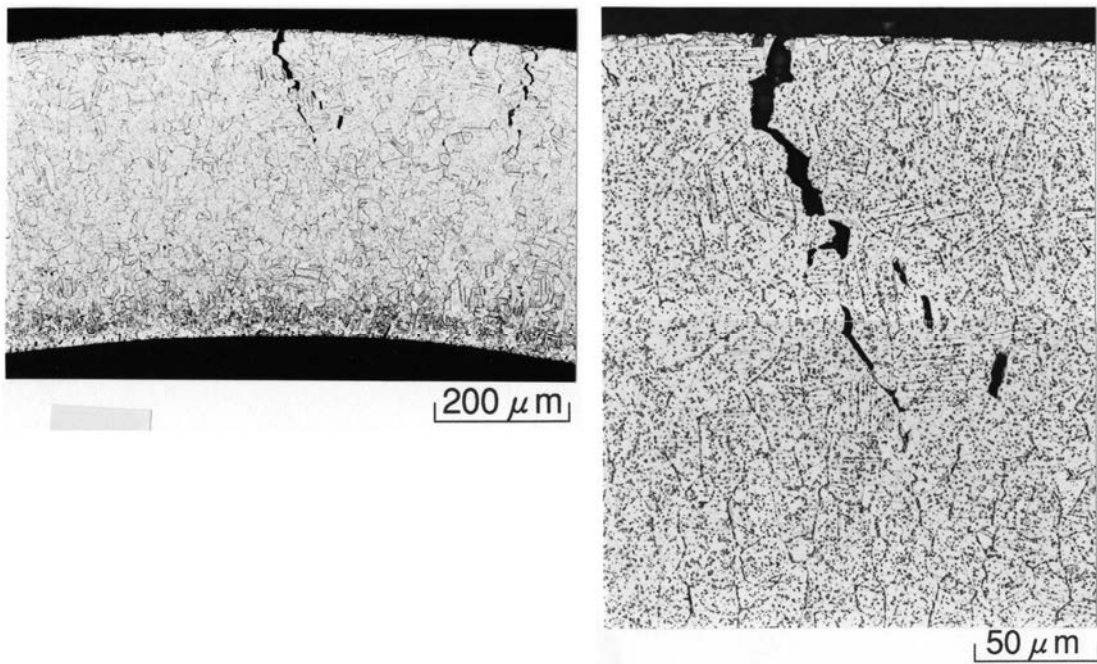


Fig.3.29 ナトリウム中内圧クリープ破損の断面組織(700 °C×約 4,000 h)

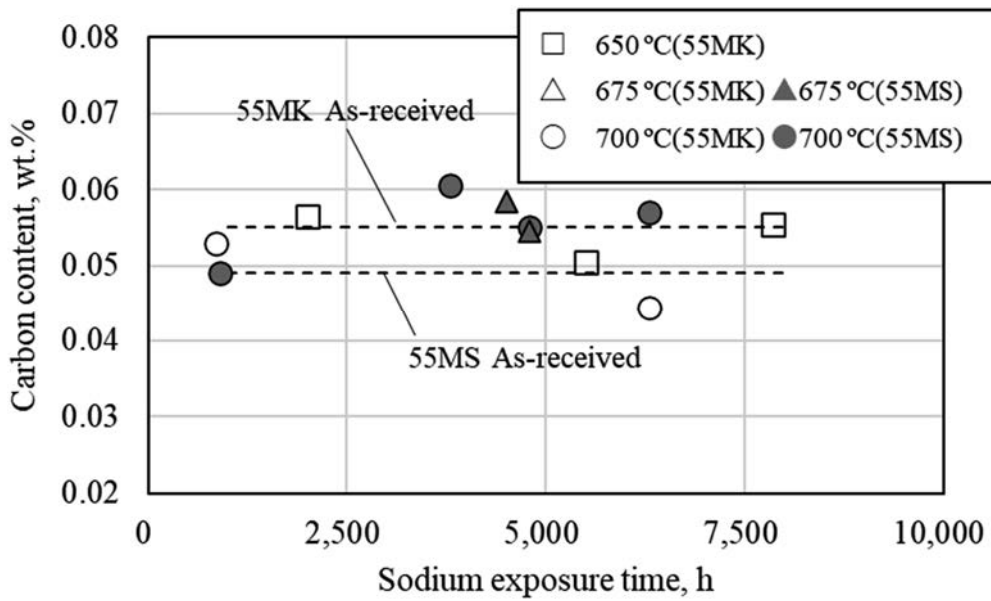


Fig.3.30 ナトリウム中内圧クリープ試験後のバルク炭素濃度の変化

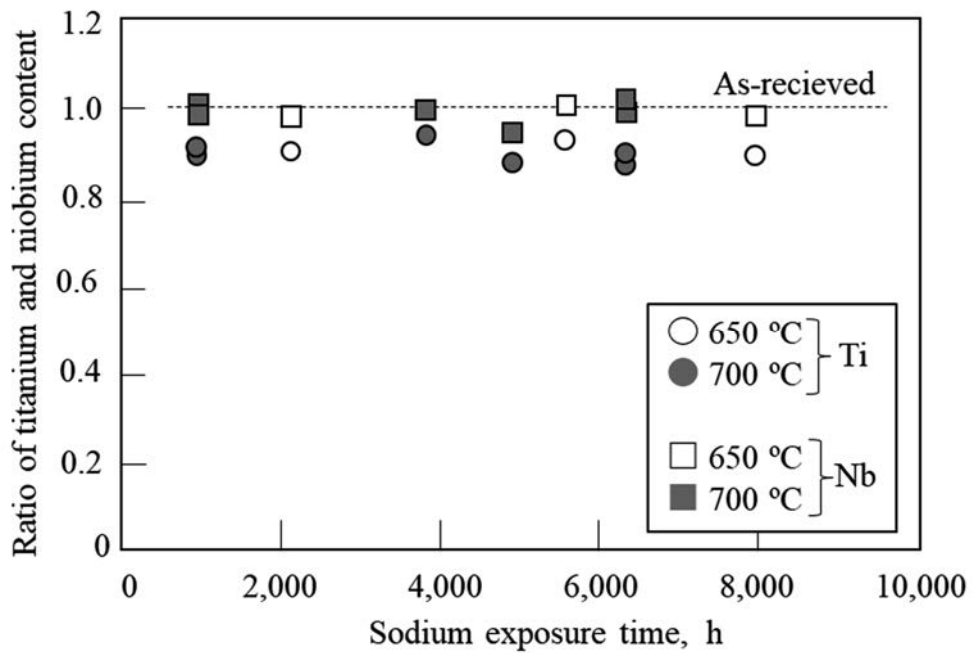


Fig.3.31 ナトリウム中内圧クリープ試験後のチタン及びニオブバルク濃度の変化

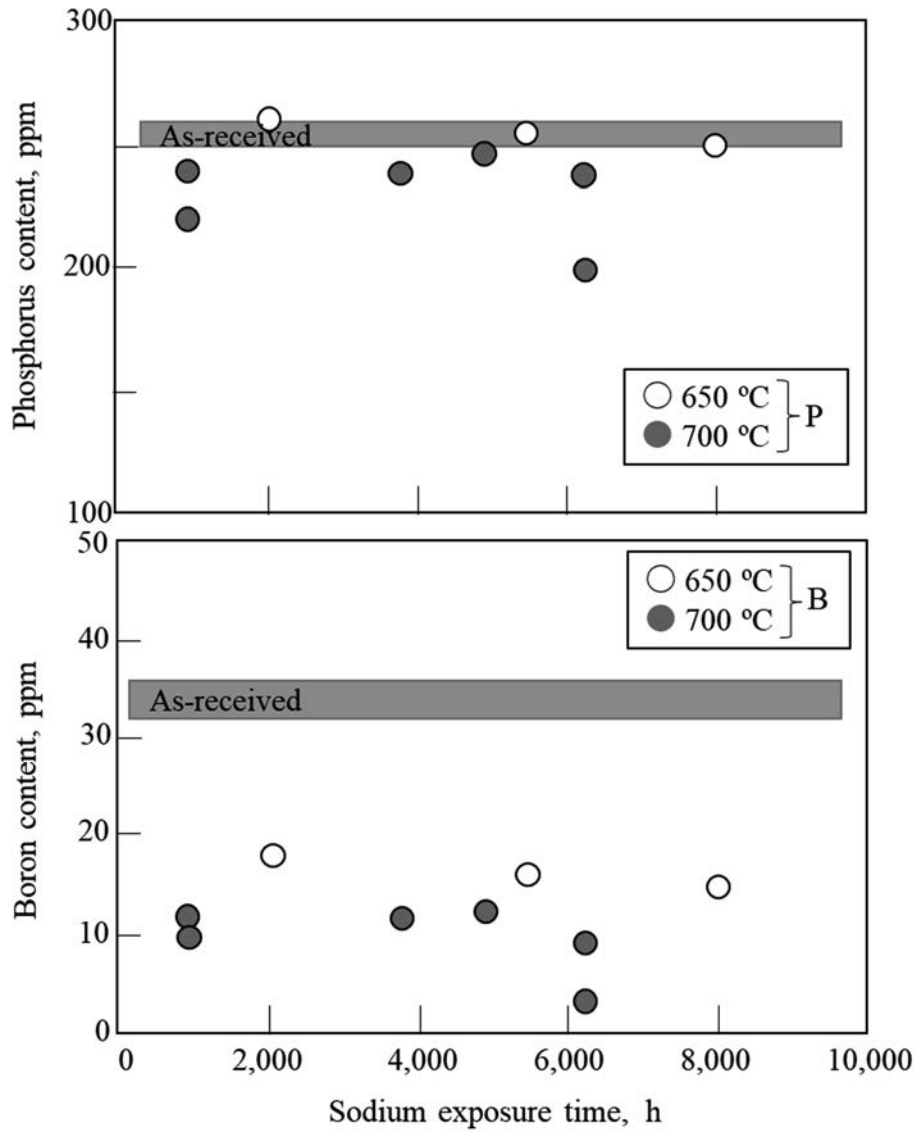


Fig.3.32 ナトリウム中内圧クリープ試験後のリン及びホウ素バルク濃度の変化

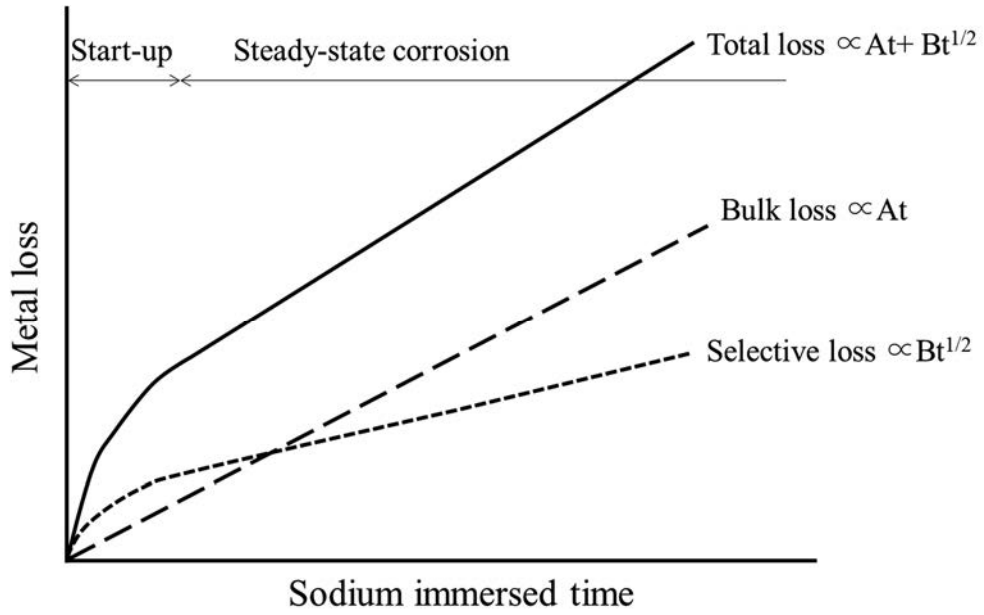


Fig.4.1 ナトリウム環境下における腐食損失の模式図[16]

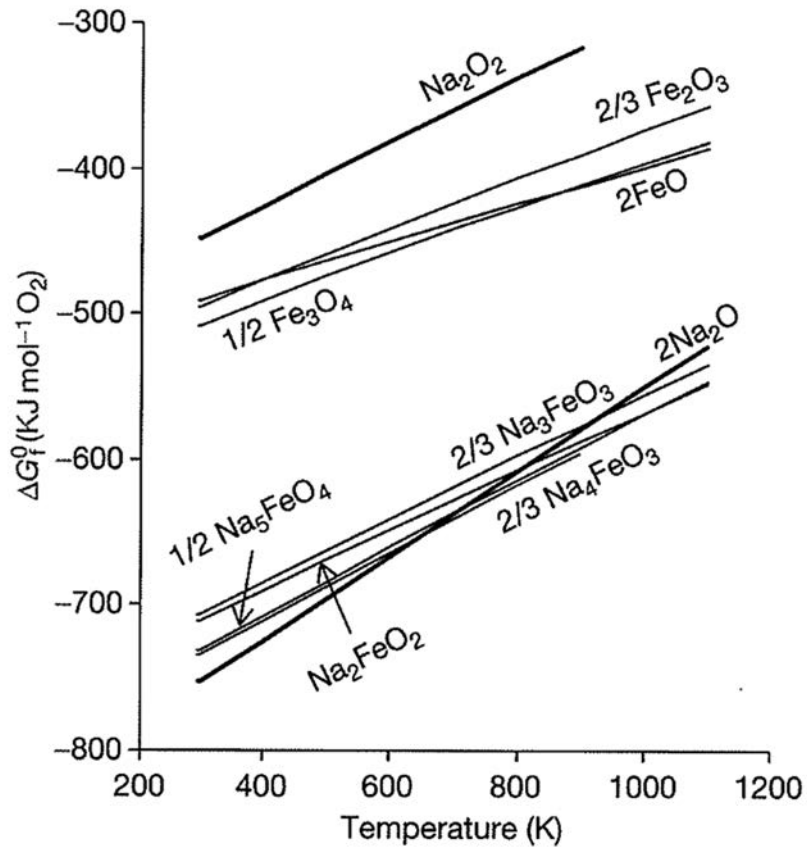


Fig.4.2 ナトリウム化合物の生成自由エネルギー[3]

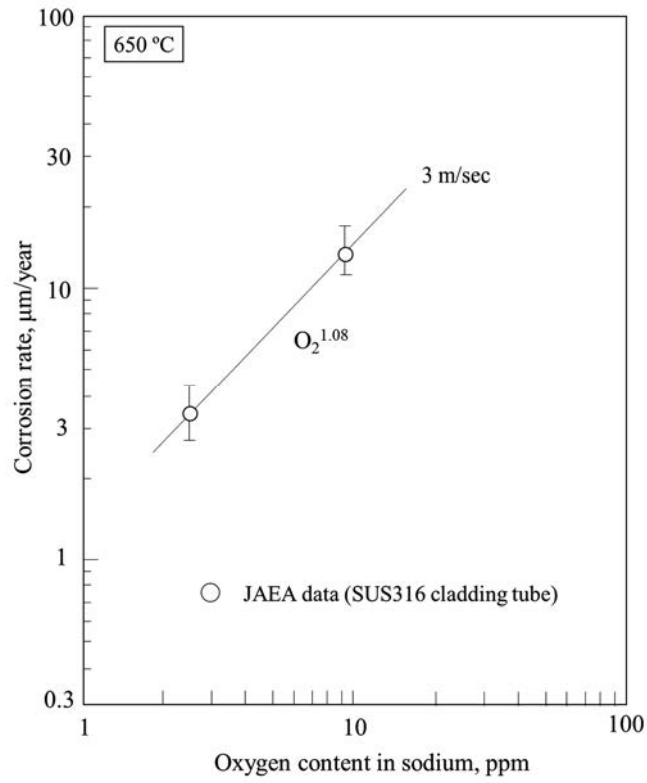


Fig.4.3 SUS316 鋼燃料被覆管の酸素濃度依存性

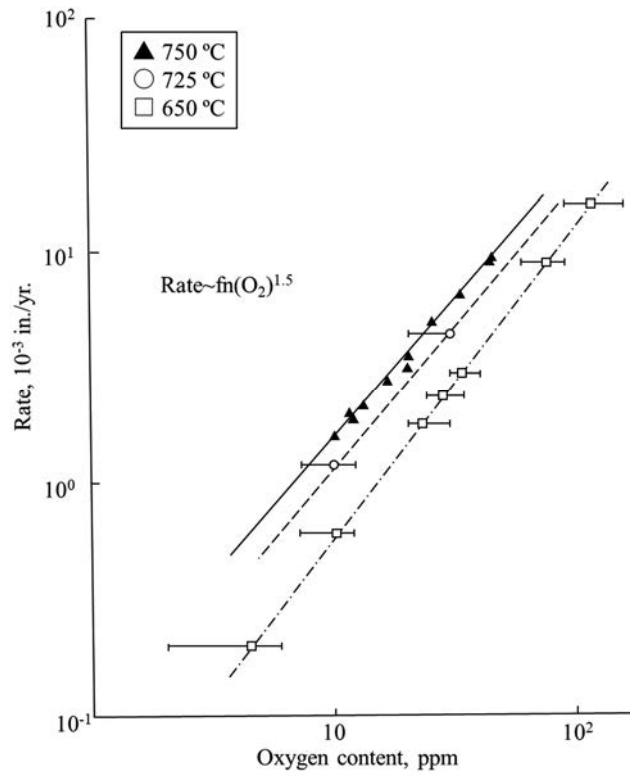


Fig.4.4 腐食速度の酸素濃度依存性[29]

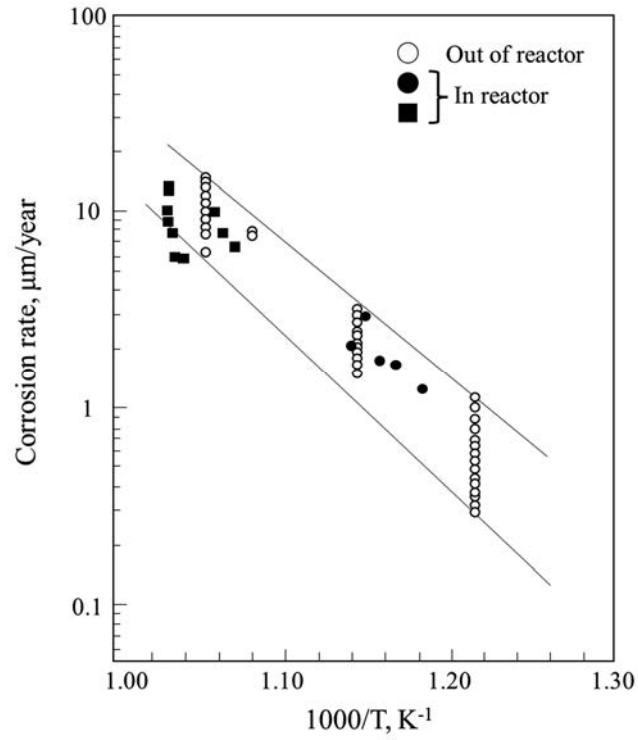


Fig.4.5 炉内と炉外のナトリウム中腐食速度の比較[34]

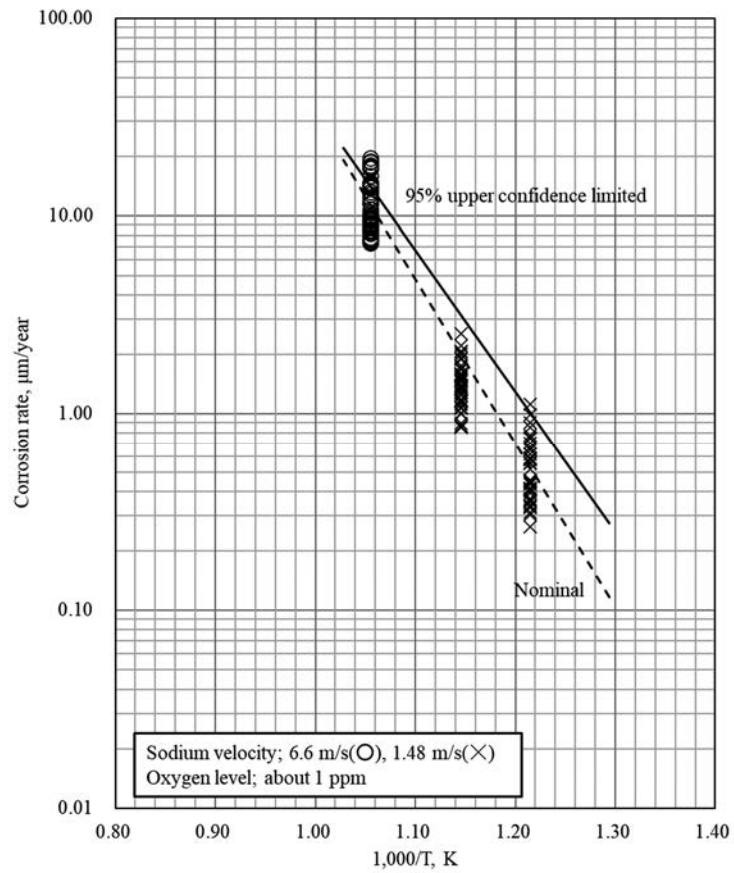


Fig.4.6 ナトリウム腐食速度の評価

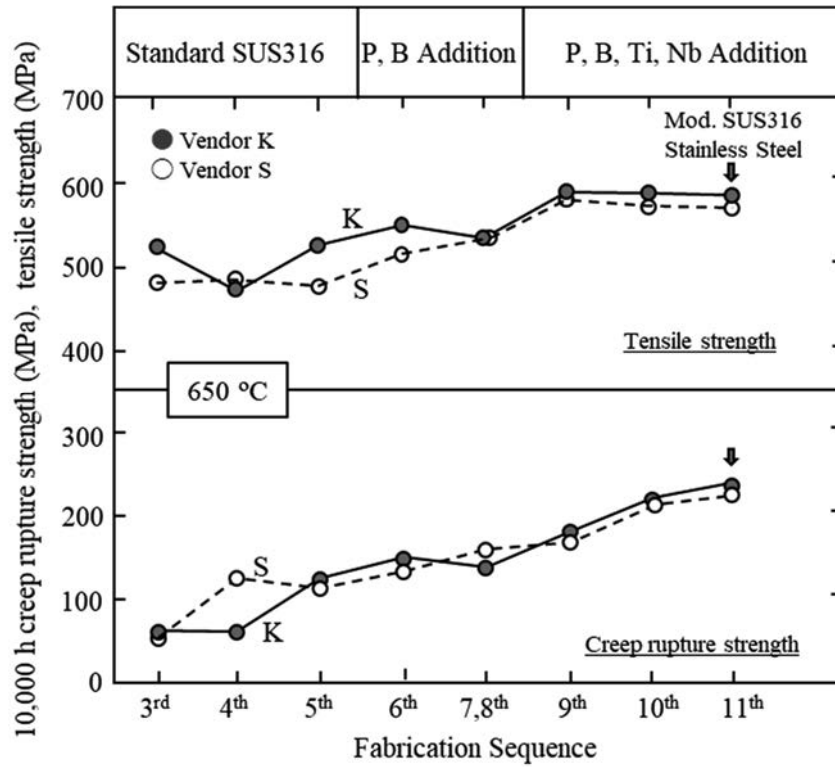


Fig.4.7 添加元素による大気中高温強度の改善効果[4]

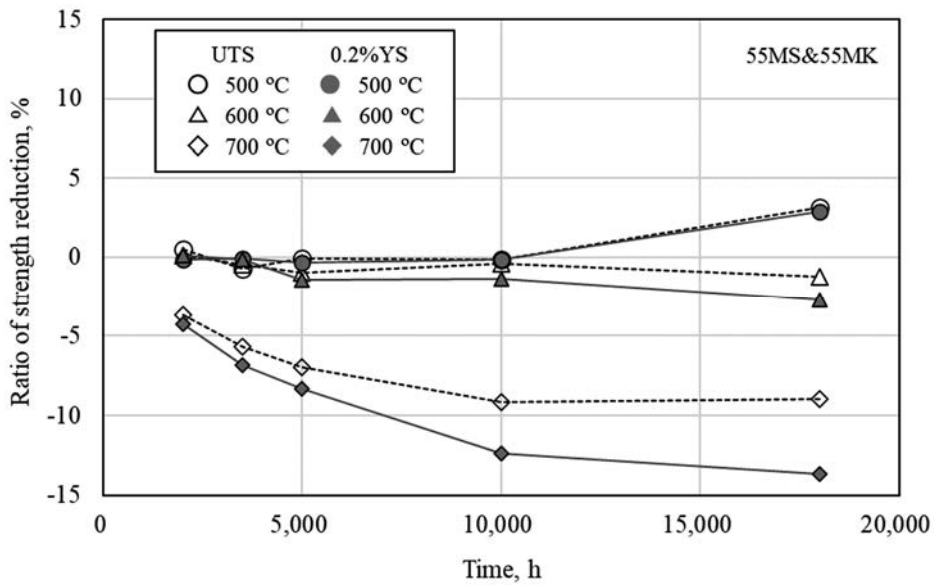


Fig.4.8 引張強度特性に及ぼすナトリウム浸漬時間の影響

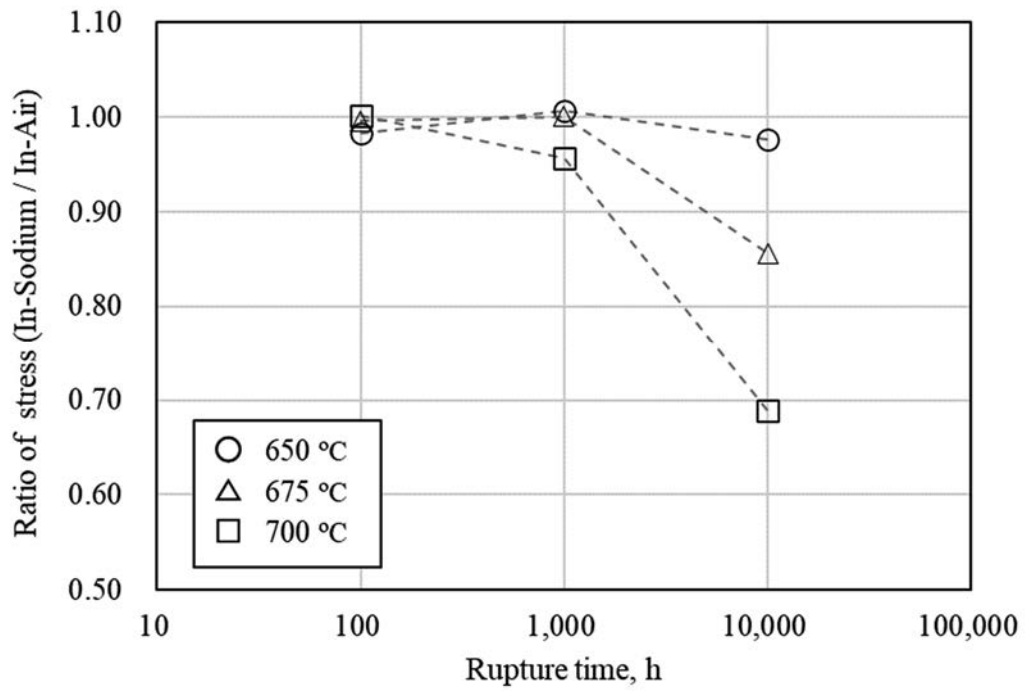


Fig.4.9 大気中とナトリウム中のクリープ破断応力比の検討

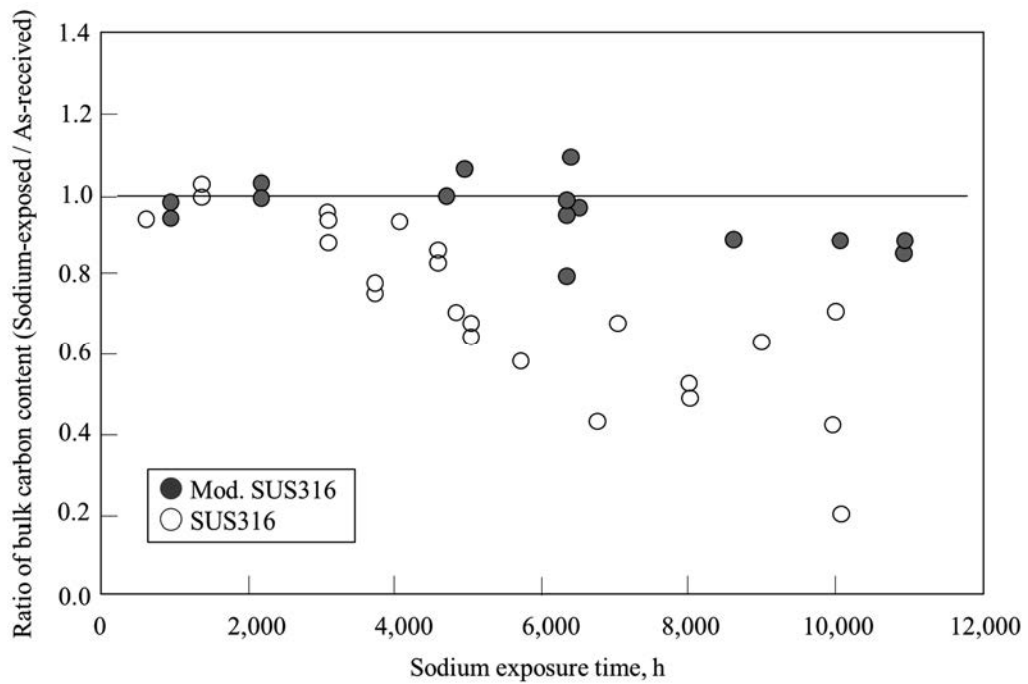


Fig.4.10 ナトリウム中クリープ試験後におけるバルク炭素濃度の変化

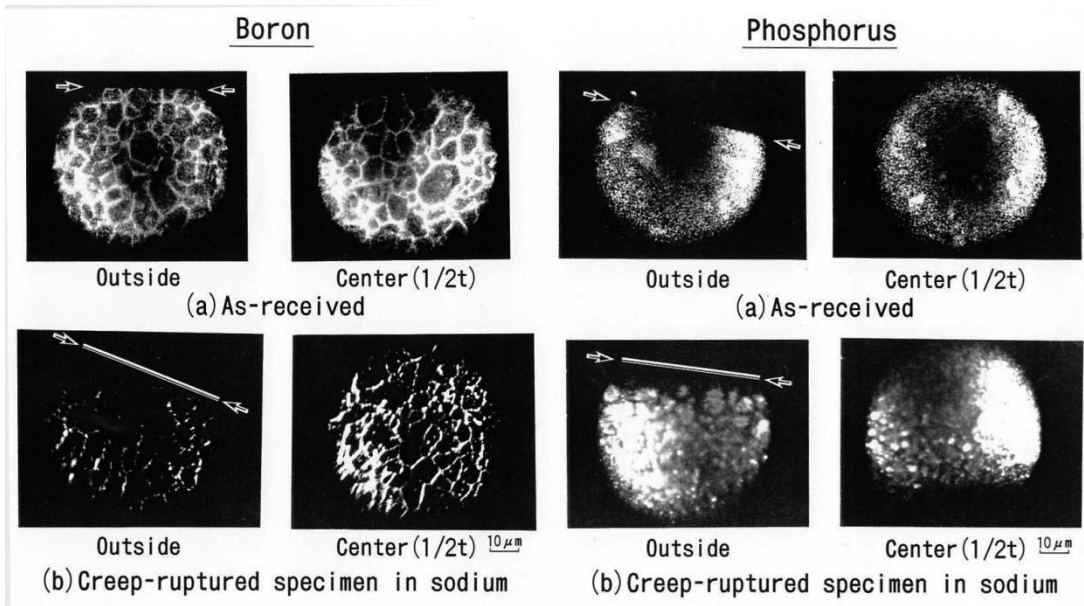


Fig.4.11 クリープ試験後のホウ素及びリン濃度の変化(700 °C×約 3,000 h)
(→← : ナトリウム接触面)

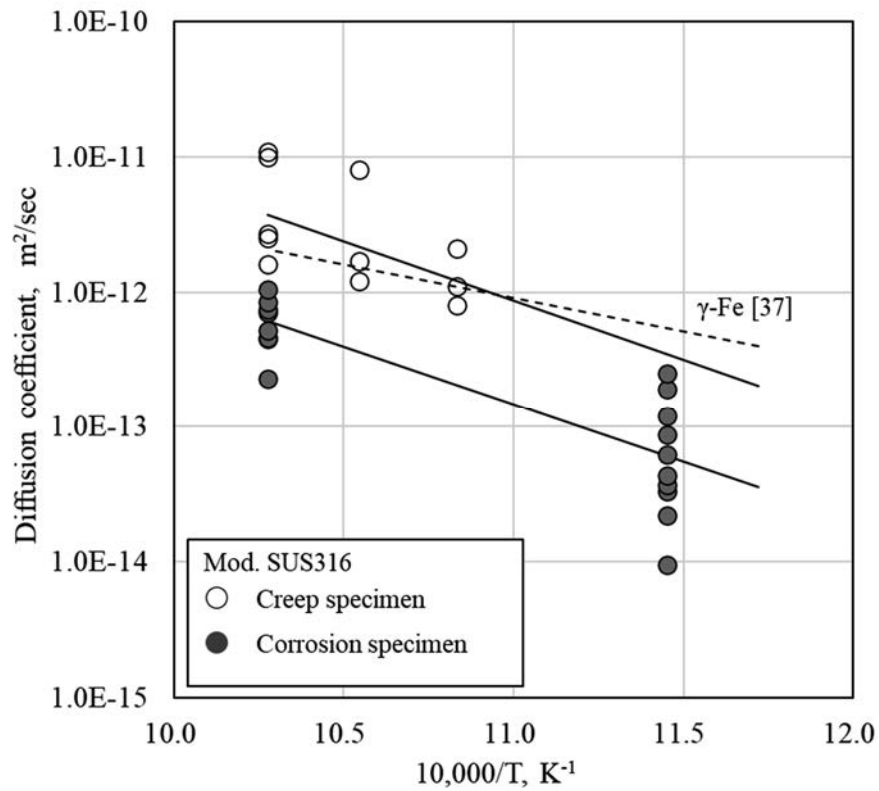


Fig.4.12 高温ナトリウム中におけるホウ素の拡散係数

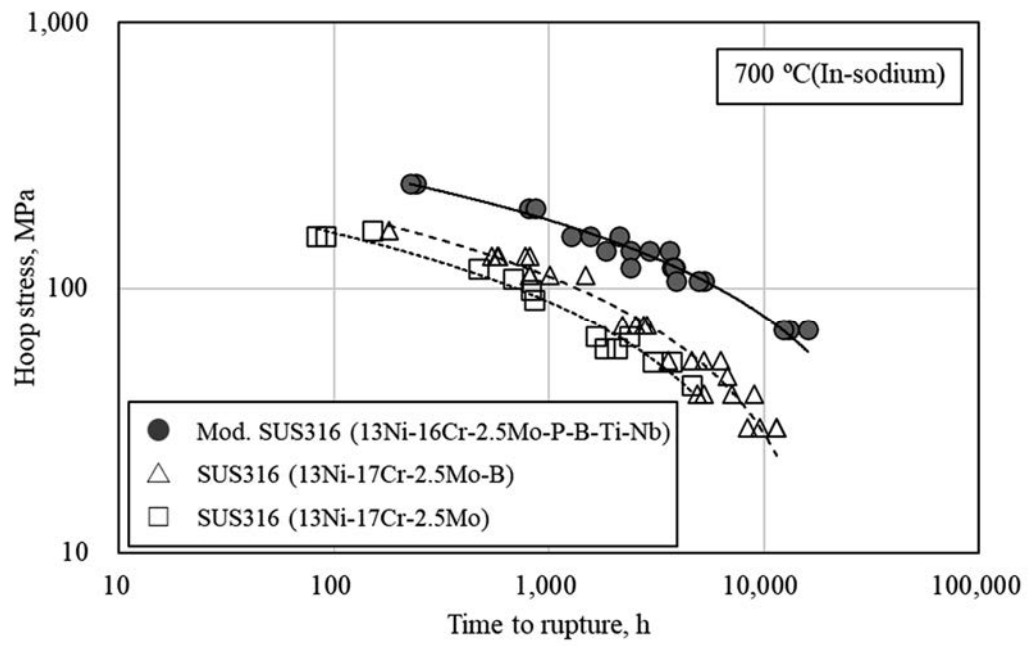


Fig.4.13 ナトリウム中内圧クリープ破断特性に及ぼす微量添加元素の効果

付 録

付録I ナトリウム中腐食挙動データ

付録II 短時間強度特性データ(受入材、ナトリウム浸漬材、熱時効材)

付録III 内圧クリープ破断特性データ(ナトリウム中、大気中)

This is a blank page.

付録I ナトリウム中腐食挙動データ

- 付録I-1 ナトリウム中腐食挙動データ(500 °C、2,600-10,429 h、42 点)
- 付録I-2 ナトリウム中腐食挙動データ(550 °C、2,600-10,429 h、39 点)
- 付録I-3 ナトリウム中腐食挙動データ(600 °C、2,600-10,429 h、43 点)
- 付録I-4 ナトリウム中腐食挙動データ(675 °C、1,155-10,888 h、66 点)

This is a blank page.

付録I-1 ナトリウム中腐食挙動データ(500℃)

材料	流速 (m/s)	酸素濃度 (ppm)	温度 (°C)	腐食時間 (h)	重量変化 (g/mm ²)	腐食速度 (μm/year)	下流位置 (L/D)
55MS	1.48	1	500	2,600	1.60E-07	0.067	123
55MK	1.48	1	500	2,600	2.00E-07	0.084	128
55MS	1.48	1	500	2,600	1.40E-07	0.059	162
55MK	1.48	1	500	2,600	2.10E-07	0.088	167
55MS	1.48	1	500	4,890	7.10E-07	0.160	94
55MK	1.48	1	500	4,890	2.50E-06	0.560	99
55MS	1.48	1	500	4,890	7.70E-07	0.170	104
55MK	1.48	1	500	4,890	8.40E-07	0.190	109
55MS	1.48	1	500	4,890	6.60E-07	0.150	113
55MK	1.48	1	500	4,890	7.00E-07	0.160	118
55MS	1.48	1	500	4,890	4.70E-07	0.100	123
55MK	1.48	1	500	4,890	4.80E-07	0.110	128
55MS	1.48	1	500	4,890	8.00E-07	0.180	133
55MK	1.48	1	500	4,890	6.30E-07	0.140	138
55MS	1.48	1	500	4,890	8.70E-07	0.190	143
55MK	1.48	1	500	4,890	5.20E-07	0.120	147
55MS	1.48	1	500	4,890	8.10E-07	0.180	152
55MK	1.48	1	500	4,890	6.00E-07	0.130	157
55MS	1.48	1	500	4,890	8.50E-07	0.190	162
55MK	1.48	1	500	4,890	4.70E-07	0.100	167
55MS	1.48	1	500	4,890	5.10E-07	0.110	172
55MS	1.48	1	500	7,490	7.90E-07	0.115	94
55MK	1.48	1	500	7,490	8.40E-07	0.122	99
55MS	1.48	1	500	7,490	8.10E-07	0.118	104
55MK	1.48	1	500	7,490	9.10E-07	0.132	109
55MS	1.48	1	500	7,490	7.30E-07	0.106	113
55MK	1.48	1	500	7,490	6.00E-07	0.087	118
55MS	1.48	1	500	7,490	7.80E-07	0.113	133
55MK	1.48	1	500	7,490	9.60E-07	0.139	138
55MS	1.48	1	500	7,490	1.29E-06	0.187	143
55MK	1.48	1	500	7,490	8.00E-07	0.116	147
55MS	1.48	1	500	7,490	1.23E-06	0.178	152
55MK	1.48	1	500	7,490	6.70E-07	0.097	157
55MS	1.48	1	500	7,490	8.30E-07	0.120	172
55MS	1.48	1	500	10,429	7.70E-07	0.080	94
55MK	1.48	1	500	10,429	9.70E-07	0.101	99
55MS	1.48	1	500	10,429	9.20E-07	0.096	113
55MK	1.48	1	500	10,429	7.80E-07	0.081	118
55MS	1.48	1	500	10,429	1.02E-06	0.106	133
55MK	1.48	1	500	10,429	8.60E-07	0.090	138
55MS	1.48	1	500	10,429	1.08E-06	0.113	152
55MK	1.48	1	500	10,429	7.70E-07	0.080	157

付録I-2 ナトリウム中腐食挙動データ(550℃)

材料	流速 (m/s)	酸素濃度 (ppm)	温度 (°C)	腐食時間 (h)	重量変化 (g/mm ²)	腐食速度 (μm/year)	下流位置 (L/D)
55MS	1.48	1	550	2,600	1.80E-07	0.075	123
55MK	1.48	1	550	2,600	3.10E-07	0.130	128
55MS	1.48	1	550	2,600	1.40E-07	0.059	162
55MK	1.48	1	550	2,600	4.80E-07	0.201	167
55MS	1.48	1	550	4,890	4.10E-07	0.091	94
55MK	1.48	1	550	4,890	7.50E-07	0.167	99
55MS	1.48	1	550	4,890	7.10E-07	0.158	104
55MK	1.48	1	550	4,890	1.13E-06	0.251	109
55MS	1.48	1	550	4,890	4.60E-07	0.102	113
55MK	1.48	1	550	4,890	7.60E-07	0.169	118
55MS	1.48	1	550	4,890	4.60E-07	0.102	123
55MK	1.48	1	550	4,890	1.00E-06	0.222	128
55MS	1.48	1	550	4,890	3.40E-07	0.076	133
55MK	1.48	1	550	4,890	5.20E-07	0.116	138
55MS	1.48	1	550	4,890	4.20E-07	0.093	143
55MK	1.48	1	550	4,890	5.90E-07	0.131	147
55MS	1.48	1	550	4,890	6.00E-07	0.133	152
55MK	1.48	1	550	4,890	6.60E-07	0.147	157
55MS	1.48	1	550	4,890	4.50E-07	0.100	162
55MK	1.48	1	550	4,890	7.80E-07	0.173	167
55MS	1.48	1	550	4,890	6.80E-07	0.151	172
55MS	1.48	1	550	7,490	6.40E-07	0.092	94
55MK	1.48	1	550	7,490	1.00E-06	0.145	99
55MS	1.48	1	550	7,490	8.60E-07	0.125	104
55MK	1.48	1	550	7,490	1.31E-06	0.190	109
55MS	1.48	1	550	7,490	4.80E-07	0.070	113
55MK	1.48	1	550	7,490	9.60E-07	0.139	118
55MS	1.48	1	550	7,490	6.00E-07	0.088	133
55MK	1.48	1	550	7,490	6.20E-07	0.090	138
55MS	1.48	1	550	7,490	5.10E-07	0.074	143
55MK	1.48	1	550	7,490	6.70E-07	0.097	147
55MS	1.48	1	550	7,490	6.80E-07	0.099	152
55MS	1.48	1	550	10,429	7.80E-07	0.081	94
55MK	1.48	1	550	10,429	1.19E-06	0.124	99
55MS	1.48	1	550	10,429	6.50E-07	0.068	113
55MK	1.48	1	550	10,429	1.25E-06	0.130	118
55MS	1.48	1	550	10,429	7.60E-07	0.079	133
55MK	1.48	1	550	10,429	7.90E-07	0.082	138
55MS	1.48	1	550	10,429	8.90E-07	0.093	152

付録I-3 ナトリウム中腐食挙動データ(600℃)

材料	流速 (m/s)	酸素濃度 (ppm)	温度 (°C)	腐食時間 (h)	重量変化 (g/mm ²)	腐食速度 (μm/year)	下流位置 (L/D)
55MS	1.48	1	600	2,600	8.30E-07	0.347	123
55MK	1.48	1	600	2,600	1.36E-06	0.569	128
55MS	1.48	1	600	2,600	6.90E-07	0.288	162
55MK	1.48	1	600	2,600	1.19E-06	0.497	167
55MS	1.48	1	600	4,890	1.37E-06	0.304	94
55MK	1.48	1	600	4,890	2.07E-06	0.460	99
55MS	1.48	1	600	4,890	1.08E-06	0.240	104
55MK	1.48	1	600	4,890	1.50E-06	0.333	109
55MS	1.48	1	600	4,890	1.37E-06	0.304	113
55MK	1.48	1	600	4,890	1.49E-06	0.331	118
55MS	1.48	1	600	4,890	1.09E-06	0.242	123
55MK	1.48	1	600	4,890	1.68E-06	0.373	128
55MS	1.48	1	600	4,890	1.29E-06	0.287	133
55MK	1.48	1	600	4,890	1.91E-06	0.425	138
55MS	1.48	1	600	4,890	1.34E-06	0.298	143
55MK	1.48	1	600	4,890	2.01E-06	0.447	147
55MS	1.48	1	600	4,890	8.70E-07	0.193	152
55MK	1.48	1	600	4,890	1.59E-06	0.353	157
55MS	1.48	1	600	4,890	1.02E-06	0.227	162
55MK	1.48	1	600	4,890	1.33E-06	0.296	167
55MS	1.48	1	600	4,890	1.08E-06	0.240	172
55MS	1.48	1	600	7,490	2.14E-06	0.311	94
55MK	1.48	1	600	7,490	3.20E-06	0.464	99
55MS	1.48	1	600	7,490	1.78E-06	0.258	104
55MK	1.48	1	600	7,490	2.47E-06	0.358	109
55MS	1.48	1	600	7,490	1.91E-06	0.277	113
55MK	1.48	1	600	7,490	2.36E-06	0.342	118
55MS	1.48	1	600	7,490	1.82E-06	0.264	133
55MK	1.48	1	600	7,490	2.63E-06	0.382	138
55MS	1.48	1	600	7,490	1.80E-06	0.261	143
55MK	1.48	1	600	7,490	2.70E-06	0.392	147
55MS	1.48	1	600	7,490	1.38E-06	0.200	152
55MK	1.48	1	600	7,490	2.42E-06	0.351	157
55MS	1.48	1	600	7,490	1.54E-06	0.223	172
55MS	1.48	1	600	10,429	2.49E-06	0.259	94
55MK	1.48	1	600	10,429	4.12E-06	0.429	99
55MS	1.48	1	600	10,429	2.40E-06	0.250	113
55MK	1.48	1	600	10,429	3.11E-06	0.324	118
55MS	1.48	1	600	10,429	2.30E-06	0.240	133
55MK	1.48	1	600	10,429	3.39E-06	0.353	138
55MS	1.48	1	600	10,429	1.83E-06	0.191	152
55MK	1.48	1	600	10,429	3.00E-06	0.313	157
55MS	1.48	1	600	10,429	1.86E-06	0.194	172

付録I-4(1/2) ナトリウム中腐食挙動データ(675 °C)

材料	流速 (m/s)	酸素濃度 (ppm)	温度 (°C)	腐食時間 (h)	重量変化 (g/mm ²)	腐食速度 (μm/year)	下流位置 (L/D)
55MS	6.6	1	675	1,155	1.31E-05	15.96	9
55MK	6.6	1	675	1,155	1.43E-05	17.44	14
55MS	6.6	1	675	1,155	1.15E-05	13.98	19
55MK	6.6	1	675	1,155	1.61E-05	19.62	24
55MS	6.6	1	675	1,155	1.21E-05	14.74	29
55MK	6.6	1	675	1,155	1.48E-05	18.01	33
55MS	6.6	1	675	1,155	1.18E-05	14.33	38
55MK	6.6	1	675	1,155	1.54E-05	18.79	43
55MS	6.6	1	675	1,155	1.17E-05	14.21	48
55MK	6.6	1	675	1,155	1.53E-05	18.65	53
55MS	6.6	1	675	1,155	1.16E-05	14.12	58
55MK	6.6	1	675	1,155	1.42E-05	17.28	63
55MS	6.6	1	675	1,155	1.14E-05	13.85	67
55MK	6.6	1	675	1,155	1.46E-05	17.76	72
55MS	6.6	1	675	1,155	1.19E-05	14.46	77
55MK	6.6	1	675	1,155	1.43E-05	17.35	82
55MS	6.6	1	675	1,155	1.19E-05	13.20	86
55MK	6.6	1	675	1,155	1.43E-05	17.73	89
55MS	6.6	1	675	2,400	2.85E-05	12.91	38
55MK	6.6	1	675	2,400	3.18E-05	14.40	43
55MS	6.6	1	675	2,400	2.55E-05	11.55	77
55MK	6.6	1	675	2,400	2.65E-05	12.00	82
55MS	6.6	1	675	3,441	3.29E-05	10.39	9
55MK	6.6	1	675	3,441	3.08E-05	9.73	14
55MS	6.6	1	675	3,441	2.37E-05	7.49	19
55MK	6.6	1	675	3,441	2.90E-05	9.17	24
55MS	6.6	1	675	3,441	2.36E-05	7.46	29
55MK	6.6	1	675	3,441	3.04E-05	9.60	33
55MS	6.6	1	675	3,441	2.64E-05	8.34	38
55MK	6.6	1	675	3,441	3.19E-05	10.08	43
55MS	6.6	1	675	3,441	2.39E-05	7.55	48
55MK	6.6	1	675	3,441	2.79E-05	8.81	53
55MS	6.6	1	675	3,441	2.35E-05	7.42	58
55MK	6.6	1	675	3,441	2.82E-05	8.91	63
55MS	6.6	1	675	3,441	2.49E-05	7.86	67
55MK	6.6	1	675	3,441	2.98E-05	9.41	72
55MS	6.6	1	675	3,441	2.37E-05	7.49	77
55MK	6.6	1	675	3,441	2.79E-05	8.81	82

付録I-4(2/2) 続き

材料	流速 (m/s)	酸素濃度 (ppm)	温度 (°C)	腐食時間 (h)	重量変化 (g/mm ²)	腐食速度 (μm/year)	下流位置 (L/D)
55MS	6.6	1	675	5,832	5.13E-05	9.56	9
55MK	6.6	1	675	5,832	4.77E-05	8.89	14
55MS	6.6	1	675	5,832	3.95E-05	7.36	19
55MK	6.6	1	675	5,832	4.55E-05	8.48	24
55MS	6.6	1	675	5,832	4.12E-05	7.68	29
55MK	6.6	1	675	5,832	4.79E-05	8.93	33
55MS	6.6	1	675	5,832	4.94E-05	9.21	48
55MK	6.6	1	675	5,832	4.90E-05	9.13	53
55MS	6.6	1	675	5,832	4.89E-05	9.11	58
55MK	6.6	1	675	5,832	4.82E-05	8.98	63
55MS	6.6	1	675	5,832	4.95E-05	9.22	67
55MK	6.6	1	675	5,832	4.59E-05	8.55	72
55MS	6.6	1	675	9,250	9.81E-05	11.53	9
55MK	6.6	1	675	9,250	8.47E-05	9.95	14
55MS	6.6	1	675	9,250	7.71E-05	9.06	29
55MK	6.6	1	675	9,250	8.31E-05	9.76	33
55MS	6.6	1	675	9,250	6.55E-05	7.70	48
55MK	6.6	1	675	9,250	7.58E-05	8.91	53
55MS	6.6	1	675	9,250	8.08E-05	9.49	67
55MK	6.6	1	675	9,250	7.05E-05	8.28	72
55MS	6.6	1	675	10,888	1.24E-04	12.42	9
55MK	6.6	1	675	10,888	1.08E-04	10.79	14
55MS	6.6	1	675	10,888	9.70E-05	9.68	29
55MK	6.6	1	675	10,888	9.85E-05	9.83	33
55MS	6.6	1	675	10,888	8.28E-05	8.27	48
55MK	6.6	1	675	10,888	9.02E-05	9.00	53
55MS	6.6	1	675	10,888	8.19E-05	8.18	67
55MK	6.6	1	675	10,888	8.57E-05	8.55	72

This is a blank page.

付録II 短時間強度特性データ

付録II-1 受入材の引張特性データ(25-800 °C、36 点)

付録II-2 ナトリウム浸漬材の引張特性データ(500-700 °C、2,000-18,000 h、97 点)

付録II-3 熱時効材の引張特性データ(500-700 °C、2,000-18,000 h、94 点)

This is a blank page.

付録II-1(1/2) 受入材の引張特性データ(55MS)

材料	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MS	300	653.1	608.0	3.6
55MS	300	654.1	610.0	4.0
55MS	500	591.3	567.8	7.4
55MS	500	591.3	570.7	6.4
55MS	600	575.7	500.1	8.4
55MS	600	578.6	503.1	9.2
55MS	700	463.9	368.7	6.0
55MS	700	466.8	390.3	7.2
55MS	800	323.6	256.9	38.0
55MS	800	318.7	251.1	44.0

付録II-1(2/2) 受入材の引張特性データ(55MK)

材料	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MK	25	795.3	650.2	16.0
55MK	25	799.2	647.2	14.6
55MK	25	811.0	699.2	15.9
55MK	25	809.0	672.7	18.2
55MK	25	803.2	645.3	13.6
55MK	300	683.5	590.4	4.0
55MK	300	683.5	600.2	2.4
55MK	500	661.0	579.6	7.2
55MK	500	654.1	567.8	7.0
55MK	500	660.0	603.1	7.3
55MK	500	657.0	611.9	7.6
55MK	500	656.1	537.4	6.5
55MK	600	589.4	491.3	7.8
55MK	600	597.2	505.0	8.4
55MK	600	601.1	529.6	9.9
55MK	600	606.1	549.2	9.1
55MK	600	595.3	512.9	7.2
55MK	675	513.9	434.4	6.3
55MK	675	515.8	433.5	6.2
55MK	700	465.8	376.6	15.8
55MK	700	479.5	386.4	13.4
55MK	700	470.7	372.7	18.2
55MK	700	472.7	373.6	14.2
55MK	700	463.9	369.7	10.3
55MK	800	309.9	233.4	42.0
55MK	800	308.9	228.5	40.6

付録II-2(1/4) ナトリウム浸漬材の引張特性データ(55MS, 2,000-5,000 h)

材料	ナトリウム 浸漬時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MS	2,000	500	669.8	563.9	11.0
55MS	2,000	500	665.9	563.9	12.6
55MS	2,000	600	564.9	474.6	8.2
55MS	2,000	600	572.7	498.2	9.2
55MS	2,000	700	379.5	295.2	27.0
55MS	2,000	700	374.6	283.4	30.6
55MS	3,500	500	663.9	558.0	10.2
55MS	3,500	500	658.0	558.0	12.4
55MS	3,500	500	661.0	559.0	9.8
55MS	3,500	600	564.9	486.4	9.6
55MS	3,500	600	564.9	489.4	8.6
55MS	3,500	600	567.8	487.4	11.0
55MS	3,500	700	357.9	270.7	25.2
55MS	3,500	700	361.9	272.6	24.4
55MS	3,500	700	361.9	272.6	25.2
55MS	5,000	500	661.0	561.9	12.6
55MS	5,000	500	659.0	555.1	11.0
55MS	5,000	500	670.8	564.9	12.0
55MS	5,000	600	562.9	476.6	10.6
55MS	5,000	600	564.9	475.6	10.4
55MS	5,000	600	569.8	488.4	10.0
55MS	5,000	650	469.7	371.7	13.9
55MS	5,000	650	454.0	357.9	8.6
55MS	5,000	675	413.8	316.8	16.7
55MS	5,000	675	410.9	316.8	17.7
55MS	5,000	700	350.1	258.9	33.0
55MS	5,000	700	357.9	266.7	38.0
55MS	5,000	700	356.0	264.8	39.6

付録II-2(2/4) ナトリウム浸漬材の引張特性データ(55MS, 10,000-18,000 h)

材料	ナトリウム 浸漬時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MS	10,000	500	691.4	597.2	12.1
55MS	10,000	500	694.3	589.4	9.8
55MS	10,000	500	693.3	589.4	9.6
55MS	10,000	600	587.4	489.4	9.1
55MS	10,000	600	596.2	489.4	10.8
55MS	10,000	600	593.3	490.3	10.1
55MS	10,000	700	356.0	253.0	18.4
55MS	10,000	700	354.0	256.0	24.7
55MS	10,000	700	356.0	256.0	27.8
55MS	18,000	500	681.6	582.5	10.7
55MS	18,000	500	674.7	574.7	10.1
55MS	18,000	500	679.6	574.7	12.1
55MS	18,000	600	557.0	451.1	8.6
55MS	18,000	600	560.9	439.3	10.3
55MS	18,000	600	555.1	447.2	8.6
55MS	18,000	700	334.4	240.3	21.9
55MS	18,000	700	339.3	239.3	20.0
55MS	18,000	700	339.3	238.3	29.0

付録II-2(3/4) ナトリウム浸漬材の引張特性データ(55MK, 2,000-5,000 h)

材料	ナトリウム 浸漬時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MK	2,000	500	676.7	560.0	10.0
55MK	2,000	500	680.6	564.9	9.6
55MK	2,000	600	575.7	490.3	5.6
55MK	2,000	600	567.8	479.5	7.0
55MK	2,000	700	363.8	276.5	22.4
55MK	2,000	700	366.8	278.5	27.0
55MK	3,500	500	665.9	567.8	10.0
55MK	3,500	500	685.5	567.8	10.4
55MK	3,500	500	686.5	578.6	9.0
55MK	3,500	600	564.9	480.5	6.8
55MK	3,500	600	563.9	479.5	8.2
55MK	3,500	600	564.9	475.6	8.0
55MK	3,500	700	353.0	263.8	30.0
55MK	3,500	700	356.0	266.7	31.0
55MK	3,500	700	354.0	266.7	24.8
55MK	5,000	500	679.6	559.0	9.6
55MK	5,000	500	679.6	552.1	10.6
55MK	5,000	500	678.6	550.2	10.2
55MK	5,000	600	564.9	472.7	9.0
55MK	5,000	600	570.7	475.6	9.0
55MK	5,000	600	563.9	475.6	9.0
55MK	5,000	650	452.1	359.9	7.1
55MK	5,000	650	454.0	361.9	8.1
55MK	5,000	675	397.2	306.0	15.0
55MK	5,000	675	399.1	306.0	12.9
55MK	5,000	700	355.0	260.9	31.6
55MK	5,000	700	357.0	265.8	33.6
55MK	5,000	700	356.0	265.8	32.8

付録II-2(4/4) ナトリウム浸漬材の引張特性データ(55MK, 10,000-18,000 h)

材料	ナトリウム 浸漬時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MK	10,000	500	692.3	589.4	11.6
55MK	10,000	500	695.3	579.6	11.9
55MK	10,000	500	713.9	583.5	10.2
55MK	10,000	500	709.0	590.4	9.9
55MK	10,000	500	709.0	585.5	10.6
55MK	10,000	600	554.1	453.1	10.6
55MK	10,000	600	558.0	455.0	10.7
55MK	10,000	600	579.6	475.6	9.5
55MK	10,000	600	577.6	473.7	10.0
55MK	10,000	600	580.6	479.5	9.1
55MK	10,000	700	343.2	240.3	27.5
55MK	10,000	700	341.3	238.3	23.6
55MK	10,000	700	357.0	256.0	25.1
55MK	10,000	700	355.0	254.0	20.4
55MK	10,000	700	352.1	251.1	24.3
55MK	18,000	500	708.0	592.3	9.0
55MK	18,000	500	692.3	576.6	9.8
55MK	18,000	500	685.5	577.6	8.3
55MK	18,000	600	553.1	444.2	8.3
55MK	18,000	600	540.3	440.3	10.0
55MK	18,000	600	541.3	440.3	9.3
55MK	18,000	700	332.4	234.4	27.6
55MK	18,000	700	333.4	225.6	20.2

付録II-3(1/4) 熱時効材の引張特性データ(55MS, 2,000-5,000 h)

材料	熱時効 時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MS	2,000	500	660.0	564.9	10.8
55MS	2,000	500	662.9	563.9	11.2
55MS	2,000	500	662.9	559.0	11.6
55MS	2,000	600	572.7	496.2	8.4
55MS	2,000	600	572.7	496.2	7.6
55MS	2,000	600	563.9	491.3	8.0
55MS	2,000	700	392.3	297.1	28.6
55MS	2,000	700	394.2	304.0	24.8
55MS	2,000	700	393.2	302.0	26.0
55MS	3,500	500	662.9	563.9	13.2
55MS	3,500	500	661.0	559.0	11.0
55MS	3,500	500	665.9	568.8	11.4
55MS	3,500	600	567.8	490.3	8.6
55MS	3,500	600	567.8	481.5	9.4
55MS	3,500	600	567.8	484.4	9.2
55MS	3,500	700	390.3	298.1	28.4
55MS	3,500	700	380.5	289.3	28.8
55MS	3,500	700	388.3	296.2	24.8
55MS	5,000	500	662.9	557.0	11.4
55MS	5,000	500	662.9	553.1	11.6
55MS	5,000	500	660.0	563.9	12.0
55MS	5,000	600	578.6	493.3	10.0
55MS	5,000	600	573.7	487.4	11.0
55MS	5,000	600	571.7	487.4	10.4
55MS	5,000	650	501.1	403.1	8.9
55MS	5,000	650	503.1	402.1	10.0
55MS	5,000	700	386.4	295.2	28.0
55MS	5,000	700	387.4	293.2	33.0
55MS	5,000	700	393.2	300.1	27.6

付録II-3(2/4) 熱時効材の引張特性データ(55MS, 10,000-18,000 h)

材料	熱時効 時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MS	10,000	500	689.4	588.4	9.6
55MS	10,000	500	696.3	591.3	11.1
55MS	10,000	500	690.4	579.6	12.4
55MS	10,000	600	593.3	499.2	9.3
55MS	10,000	600	587.4	490.3	8.8
55MS	10,000	600	596.2	496.2	7.8
55MS	10,000	700	396.2	296.2	13.4
55MS	10,000	700	398.1	291.3	12.4
55MS	10,000	700	400.1	304.0	12.2
55MS	18,000	500	656.1	557.0	11.9
55MS	18,000	500	654.1	558.0	12.0
55MS	18,000	500	661.0	563.9	11.3
55MS	18,000	600	561.9	459.0	8.9
55MS	18,000	600	558.0	458.0	9.5
55MS	18,000	600	570.7	465.8	8.9
55MS	18,000	700	368.7	277.5	10.2
55MS	18,000	700	373.6	265.8	10.2
55MS	18,000	700	377.6	283.4	14.3

付録II-3(3/4) 熱時効材の引張特性データ(55MK, 2,000-5,000 h)

材料	熱時効 時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MK	2,000	500	676.7	564.9	9.6
55MK	2,000	500	680.6	567.8	11.2
55MK	2,000	500	675.7	561.9	10.2
55MK	2,000	600	569.8	482.5	5.2
55MK	2,000	600	568.8	462.9	8.4
55MK	2,000	600	569.8	480.5	6.0
55MK	2,000	700	377.6	292.2	27.2
55MK	2,000	700	377.6	291.3	21.0
55MK	2,000	700	377.6	289.3	24.4
55MK	3,500	500	678.6	561.9	10.0
55MK	3,500	500	694.3	568.8	9.4
55MK	3,500	500	686.5	568.8	10.8
55MK	3,500	600	566.8	481.5	7.8
55MK	3,500	600	568.8	481.5	7.2
55MK	3,500	600	567.8	482.5	7.0
55MK	3,500	700	370.7	282.4	22.4
55MK	3,500	700	373.6	284.4	26.6
55MK	3,500	700	370.7	281.5	25.2
55MK	5,000	500	688.4	569.8	10.0
55MK	5,000	500	678.6	554.1	12.0
55MK	5,000	500	678.6	556.0	11.0
55MK	5,000	600	571.7	480.5	7.6
55MK	5,000	600	567.8	479.5	8.0
55MK	5,000	600	567.8	478.6	9.0
55MK	5,000	650	491.3	393.2	12.6
55MK	5,000	650	489.4	387.4	12.6
55MK	5,000	700	372.7	277.5	30.0
55MK	5,000	700	376.6	281.5	28.4
55MK	5,000	700	375.6	279.5	30.6

付録II-3(4/4) 熱時効材の引張特性データ(55MK, 10,000-18,000 h)

材料	熱時効 時間	温度	引張 強さ	0.2% 耐力	伸び
	(h)	(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
55MK	10,000	500	716.9	598.2	10.5
55MK	10,000	500	709.0	585.5	10.2
55MK	10,000	500	714.9	597.2	10.4
55MK	10,000	600	585.5	488.4	8.3
55MK	10,000	600	583.5	483.5	8.3
55MK	10,000	600	582.5	479.5	8.6
55MK	10,000	700	383.4	284.4	17.3
55MK	10,000	700	386.4	290.3	15.1
55MK	10,000	700	380.5	275.6	21.4
55MK	18,000	500	677.6	565.8	9.5
55MK	18,000	500	669.8	564.9	9.6
55MK	18,000	500	677.6	570.7	7.7
55MK	18,000	600	559.0	459.9	9.6
55MK	18,000	600	550.2	451.1	7.6
55MK	18,000	600	550.2	442.3	11.9
55MK	18,000	700	363.8	266.7	17.0
55MK	18,000	700	358.9	264.8	22.9
55MK	18,000	700	367.7	272.6	20.0

付録III 内圧クリープ破断特性データ

付録III-1 ナトリウム中内圧クリープ破断データ(650-700 °C、29-17,230 h、64 点)

付録III-2 大気中内圧クリープ破断データ(600-852 °C、27-23,222 h、93 点)

This is a blank page.

付録III-1(1/2) ナトリウム中内圧クリープ破断特性データ(55MS)

材料	試験環境	温度	周応力	破断時間	破断伸び	平均クリープ速度	破損形態	
		(°C)	(MPa)	(h)	(%)	(%/hr)		
55MS	Na	650	305.0	870.4	—	—	—	
55MS	Na	650	213.8	8,090.7	—	—	—	
55MS	Na	650	213.8	11,818.2	0.691	0.58E-04	—	
55MS	Na	650	236.3	4,103.3	—	—	—	
55MS	Na	650	263.8	2,603.1	0.760	0.29E-03	V	
55MS	Na	675	255.0	2,120.2	1.370	0.65E-03	F	
55MS	Na	675	216.7	2,547.1	1.070	0.42E-03	F	
55MS	Na	675	216.7	3,130.0	—	—	—	
55MS	Na	675	192.2	4,683.6	1.890	0.40E-03	F	
55MS	Na	675	192.2	3,209.2	1.350	0.42E-03	P	
55MS	Na	675	159.8	7,022.2	1.600	0.23E-03	P	
55MS	Na	675	159.8	8,841.1	—	—	—	
55MS	Na	675	156.9	7,972.0	2.040	0.26E-03	F	
55MS	Na	675	156.9	6,501.0	1.320	0.20E-03	F	
55MS	Na	675	107.9	(3,278.0 Interrupted)				
55MS	Na	675	191.2	4,245.7	—	—	—	
55MS	Na	675	159.8	8,950.9	1.704	0.19E-03	F	
55MS	Na	675	159.8	8,422.5	1.544	0.18E-03	F	
55MS	Na	675	156.9	9,667.3	1.188	0.12E-03	F	
55MS	Na	675	156.9	9,660.3	—	—	F	
55MS	Na	675	125.5	17,230.5	1.886	0.11E-03	—	
55MS	Na	700	248.1	240.0	1.350	0.56E-02	F	
55MS	Na	700	201.0	801.8	3.120	0.39E-02	V	
55MS	Na	700	156.9	1,557.1	1.310	0.84E-03	F	
55MS	Na	700	138.3	2,915.7	2.330	0.80E-03	F	
55MS	Na	700	138.3	3,613.0	2.480	0.69E-03	F	
55MS	Na	700	119.6	3,831.4	1.050	0.27E-03	F	
55MS	Na	700	119.6	3,730.3	2.480	0.66E-03	F	
55MS	Na	700	106.9	5,232.8	1.580	0.30E-03	F	
55MS	Na	700	69.6	16,035.9	—	—	—	
55MS	Na	700	69.6	13,069.9	2.934	0.22E-03	F	

*Failure type F: Fissure, P: Pinhole, V: Violent

*—: not measured

付録III-1(2/2) ナトリウム中内圧クリープ破断特性データ(55MK)

材料	試験環境	温度	周応力	破断時間	破断伸び	平均クリープ速度	破損形態
		(°C)	(MPa)	(h)	(%)	(%/hr)	
55MK	Na	650	403.1	197.8	—	—	—
55MK	Na	650	364.8	354.0	0.660	0.19E-02	—
55MK	Na	650	305.0	1,517.9	2.120	0.14E-02	P
55MK	Na	650	263.8	1,724.0	1.560	0.90E-03	V
55MK	Na	650	236.3	4,870.2	1.320	0.27E-03	V
55MK	Na	650	236.3	3,504.1	1.580	0.45E-03	F
55MK	Na	650	213.8	6,795.9	1.610	0.24E-03	F
55MK	Na	650	213.8	6,985.5	1.357	0.19E-03	V
55MK	Na	650	155.9	14,506.0	1.709	0.12E-03	F
55MK	Na	650	403.1	29.0	0.250	0.86E-02	—
55MK	Na	675	283.4	648.5	2.520	0.39E-02	V
55MK	Na	675	255.0	1,130.3	1.270	0.11E-02	F(w)
55MK	Na	675	252.0	659.5	1.020	0.15E-02	F
55MK	Na	675	216.7	1,837.4	1.860	0.10E-02	F(w)
55MK	Na	675	216.7	2,376.0	1.380	0.58E-03	V
55MK	Na	675	189.3	2,593.0	1.410	0.54E-03	—
55MK	Na	675	188.3	4,131.2	1.120	0.27E-03	F
55MK	Na	675	159.8	5,057.9	—	—	—
55MK	Na	675	159.8	6,402.1	2.310	0.36E-03	V
55MK	Na	675	156.9	7,058.1	1.090	0.15E-03	F
55MK	Na	675	156.9	6,615.7	1.550	0.23E-03	V
55MK	Na	675	125.5	9,509.7	1.000	0.11E-03	F
55MK	Na	700	248.1	224.9	2.960	0.13E-01	V
55MK	Na	700	201.0	866.4	2.220	0.26E-02	V
55MK	Na	700	156.9	2,103.9	1.890	0.90E-03	V
55MK	Na	700	156.9	1,261.3	4.140	0.33E-02	F
55MK	Na	700	138.3	1,834.6	1.130	0.62E-03	F
55MK	Na	700	138.3	2,377.2	3.150	0.13E-02	F
55MK	Na	700	119.6	3,804.8	3.340	0.88E-03	V
55MK	Na	700	119.6	(2,377.2 Interrupted)			
55MK	Na	700	106.9	4,948.3	3.330	0.67E-03	V
55MK	Na	700	106.9	3,874.3	1.470	0.38E-03	F
55MK	Na	700	69.6	12,229.9	1.903	0.16E-03	F

*Failure type F: Fissure, P: Pinhole, V: Violent, F(w): Fissure (Near welded side)

*—: not measured

付録III-2(1/2) 大気中内圧クリープ破断特性データ(55MS)

材料	試験環境	温度	周応力	破断時間	破断伸び	平均クリープ速度	破損形態
		(°C)	(MPa)	(h)	(%)	(%/hr)	
55MS	AIR	600	464.8	174.0	—	—	—
55MS	AIR	600	436.4	539.1	—	—	—
55MS	AIR	600	406.0	507.5	—	—	—
55MS	AIR	600	381.5	2,740.0	—	—	—
55MS	AIR	600	382.5	2,725.7	—	—	—
55MS	AIR	650	264.8	2,843.8	—	—	—
55MS	AIR	650	314.8	1,054.2	—	—	—
55MS	AIR	650	283.4	1,816.9	—	—	—
55MS	AIR	650	252.0	4,884.9	—	—	—
55MS	AIR	650	371.7	423.0	—	—	—
55MS	AIR	650	335.4	601.0	—	—	—
55MS	AIR	650	292.2	1,280.0	—	—	—
55MS	AIR	650	256.0	2,506.0	—	—	—
55MS	AIR	675	176.5	7,501.1	—	—	—
55MS	AIR	675	135.3	23,222.0	—	—	—
55MS	AIR	700	289.3	181.2	—	—	—
55MS	AIR	700	245.2	454.7	—	—	—
55MS	AIR	700	188.3	1,596.5	—	—	—
55MS	AIR	700	132.4	4,490.9	—	—	—
55MS	AIR	700	311.9	126.0	—	—	—
55MS	AIR	700	256.0	366.7	—	—	—
55MS	AIR	700	212.8	1,020.8	—	—	—
55MS	AIR	700	174.6	2,135.5	—	—	—
55MS	AIR	700	124.5	(Interrupted)	—	—	—
55MS	AIR	700	98.1	19,846.7	1.790	0.90E-04	—
55MS	AIR	750	186.3	70.0	—	—	—
55MS	AIR	750	155.9	127.0	—	—	—
55MS	AIR	750	137.3	391.0	—	—	—
55MS	AIR	750	112.8	885.0	—	—	—
55MS	AIR	750	176.5	140.0	—	—	—
55MS	AIR	750	138.3	389.5	—	—	—
55MS	AIR	750	94.1	1,329.9	—	—	—
55MS	AIR	750	201.0	84.7	—	—	—
55MS	AIR	750	163.8	419.6	—	—	—
55MS	AIR	750	106.9	1,919.6	—	—	—
55MS	AIR	750	205.9	96.8	—	—	—
55MS	AIR	750	168.7	280.2	—	—	—
55MS	AIR	750	121.6	1,100.7	—	—	—
55MS	AIR	750	87.3	2,689.2	—	—	—
55MS	AIR	816	29.4	7,221.0	—	—	P
55MS	AIR	852	19.6	5,377.0	—	—	P
55MS	AIR	852	19.6	5,841.6	—	—	P

*Failure type F: Fissure, P: Pinhole, V: Violent

*—: not measured

付録III-2(2/2) 大気中内圧クリープ破断特性データ(55MK)

材料	試験環境	温度	周応力	破断時間	破断伸び	平均クリープ速度	破損形態	
		(°C)	(MPa)	(h)	(%)	(%/hr)		
55MK	AIR	600	474.6	146.5	—	—	—	
55MK	AIR	600	442.3	390.1	—	—	—	
55MK	AIR	600	408.9	577.2	—	—	—	
55MK	AIR	600	386.4	1,440.0	—	—	—	
55MK	AIR	600	385.4	1,726.0	—	—	—	
55MK	AIR	650	304.0	1,439.5	—	—	—	
55MK	AIR	650	264.8	2,893.0	—	—	—	
55MK	AIR	650	215.7	(5,044.6 Interrupted)			—	—
55MK	AIR	650	314.8	1,544.1	—	—	—	
55MK	AIR	650	296.2	2,050.5	—	—	—	
55MK	AIR	650	263.8	3,893.8	—	—	—	
55MK	AIR	650	363.8	417.0	—	—	—	
55MK	AIR	650	338.3	540.0	—	—	—	
55MK	AIR	650	297.1	1,271.0	—	—	—	
55MK	AIR	650	246.1	3,402.0	—	—	—	
55MK	AIR	675	257.9	1,239.1	3.260	0.26E-02	—	
55MK	AIR	675	225.6	2,230.4	3.460	0.16E-02	—	
55MK	AIR	675	176.5	4,258.6	—	—	—	
55MK	AIR	675	135.3	11,575.0	—	—	—	
55MK	AIR	700	289.3	223.3	—	—	—	
55MK	AIR	700	245.2	364.6	—	—	—	
55MK	AIR	700	188.3	1,478.9	—	—	—	
55MK	AIR	700	132.4	5,234.9	—	—	—	
55MK	AIR	700	315.8	88.9	—	—	—	
55MK	AIR	700	258.9	274.2	—	—	—	
55MK	AIR	700	205.9	980.3	—	—	—	
55MK	AIR	700	166.7	2,847.5	—	—	—	
55MK	AIR	700	126.5	(Interrupted)			—	—
55MK	AIR	700	137.3	3,416.2	1.950	0.57E-03	P	
55MK	AIR	700	176.5	1,287.0	2.100	0.16E-02	—	
55MK	AIR	700	98.1	8,317.2	0.501	0.60E-04	—	
55MK	AIR	700	176.5	1,526.0	—	—	—	
55MK	AIR	700	176.5	1,738.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	189.3	83.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	157.9	147.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	138.3	325.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	120.6	875.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	176.5	130.6	—	—	—	
55MK	AIR	750	138.3	293.7	—	—	—	
55MK	AIR	750	94.1	1,482.9	—	—	—	
55MK	AIR	750	239.3	26.8	—	—	—	
55MK	AIR	750	163.8	294.7	—	—	—	
55MK	AIR	750	119.6	1,030.1	—	—	—	
55MK	AIR	750	207.9	64.3	—	—	—	
55MK	AIR	750	169.7	243.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	132.4	596.0	—	—	—	
55MK	AIR	750	88.3	2,690.0	—	—	—	
55MK	AIR	816	29.4	10,119.9	—	—	P	
55MK	AIR	816	29.4	7,383.0	—	—	P	
55MK	AIR	852	19.6	6,078.0	—	—	P	
55MK	AIR	852	19.6	6,100.0	—	—	P	

*Failure type F: Fissure, P: Pinhole, V: Violent

*—: not measured

