



アラカルト

NIMS クリープデータシートプロジェクト

—38年間の足跡と今後の展開—

NIMS Creep Data Sheet Project

—38 Years History and Future Prospects—

独立行政法人 物質・材料研究機構
材料基盤情報ステーション
クリープ研究グループ グループリーダー

木村一弘 Kazuhiro Kimura

同左 高温材料グループ
グループリーダー

田淵正明 Masaaki Tabuchi

同上 材料データベース研究グループ
グループリーダー

山崎政義 Masayoshi Yamazaki

1 はじめに

クリープデータシートプロジェクトは、物質・材料研究機構 (NIMS) の前身である科学技術庁金属材料技術研究所に世界最大規模のクリープ試験設備 (Figure 1) を設置して、1966年に開始された。2001年度からはNIMSに引き継がれ、これまで40年近い長期間にわたり継続して長時間クリープ試験を行い、クリープデータシートを発行している。プロジェクトの開始当時に試験対象とした材料は44材種^{*1}であり、当初計画されたクリープデータシートを作成するには30～40年程度かかると見積もられていたが¹⁾、プロジェクト開始後38年が経過した2004年3月で当初の計画をほぼ終了した。2004年3月末時点でクリープ破断した試験片本数は10,403本であり、10万時間 (約11.4年) を超える長時間クリープ試験データは、試験進行中のものを含めると708点に達する。

信頼性の高いクリープ試験データを取得するためには、厳密な温度管理が重要である。そのため、クリープデータシートプロジェクトではクリープ試験データを取得するだけな

く、クリープ試験での長期使用に伴う熱電対の材質劣化特性をも明らかにしており²⁾、この知見はクリープ試験に関するJIS規格³⁾でも附属書として引用されている。「我が国の耐熱鋼の研究開発が世界をリードすることとなった⁴⁾」ことに対しても、クリープデータシートプロジェクトは貢献できたのではないかと考えている。クリープデータシートプロジェクトの概要と長時間クリープ強度特性に関する研究内容については田中と八木による解説記事⁵⁾があるが、それから10年が経過し、プロジェクトは着実に成果を積み重ねるとともに、プロジェクトを取り巻く社会情勢は大きく変化してきている。そこで、本稿では、クリープデータシートプロジェクトの現状と今後の展望について述べる。

2 プロジェクトの現状

2.1 データシート出版

2004年3月末時点でのクリープデータシートの出版数をTable 1に示す。クリープデータシートのNo.0は試験方法およびデータシートの作成計画等を記載したものであり、No.1からNo.6までの6冊のクリープデータシートとともに1972年に発行した。その後、毎年数冊ずつのクリープデータシートを発行している。本プロジェクトでは、10万時間を超える長時間クリープ試験データを取得することを目標としているが、約1万時間までのクリープ試験データが取得できた時点でクリープデータシートの初版を発行している。3万～5万時間程度のクリープ試験データを取得した後、改訂A版を発行し、10万時間を超えるクリープ破断データを取得した後、最終版となるB版^{*2}を発行している。炭素鋼、フェライト耐熱鋼、オーステナイト耐熱鋼および超合金に関し



Figure 1 Creep testing machines in Meguro site

*1 クリープデータシートプロジェクトでは、タービンブレード用超合金などの一部の例外を除き、製品から試験片を採取している。そのため、化学成分規定が同等であっても製品形状が異なるもの、たとえばSUS 316H TB (tube) とSUS 316-HP (plate), SUS 316-B (bar) やASME SA-213 T92 (tube) とASME SA-335 P92 (pipe) などは異なる材種として扱っている。

*2 一部の材種についてはA版が最終版である。

て49冊の初版 (1st edition)、41冊のA版 (2nd edition)、34冊のB版 (Final edition) を発行しているが、2003年9月に発行した压力容器用焼入焼戻し2.25Cr-1Mo鋼鋼板のクリープデータシート (No.36B) は、プロジェクト開始当時に試験対象とした44材種^{*3}の最後のクリープデータシートである。しかし、クリープデータシートのB版は1986年から発行を開始しており、最終版であるB版を発行した時点でも破断せずクリープ試験を継続していたものの中で、2003年末までにクリープ破断した長時間試験データが146点あった。そこで、これらのB版を発行した後に取得した44材種のクリープ破断データをまとめて、『クリープデータシート最終版発行後に取得した長時間クリープ破断データ (Long-term creep rupture data obtained after publishing the final edition of the creep data sheets) No.50』として2004年3月に発行した。これにより、プロジェクト開始当時に試験対象とした44材種に関するクリープデータシート作成計画はすべて終了した。

クリープデータシートには主にクリープ破断データを掲載しているが、長時間クリープ強度特性評価や長期使用部材の余寿命診断等を行うためには、長時間クリープ試験に伴う微細組織変化も重要な情報である。そこで、長時間クリープ試験材の微細組織写真集 (Metallographic atlas of long-term crept materials) を作成し、1999年から発行している。これまでにSUS 304H TB (No.M-1, 1999年)、SUS 316H TB (No.M-2, 2002年) およびSUS 321H TB (No.M-3, 2004年) の3冊を発行している。

2.2 30万時間クリープデータの取得

クリープ破断強度は、高温での許容引張応力を決定する重要な強度特性であり、クリープデータシートは国内外の規格策定で基準的参照データとして広く利用されている。一方、原子力発電プラントなどの特に高い安全性が要求される機械

Table 1 Number of materials and publications of NRIM/NIMS Creep Data Sheet

Type	Materials	Heats	Number of publications			
			1st edition	2nd edition	Final edition	Total
Program and procedure, No.0			1	-	-	1
Carbon steel	3	19	3	3	2	8
Ferritic creep resistant steel	31	195	21	17	17	55
Austenitic creep resistant steel	16	93	15	12	9	36
Superalloy	16	53	10	9	6	25
Long-term creep rupture data, No.50			1	-	-	1
Metallographic atlas			3	-	-	3
Total	66	360	54	41	34	129

構造物では、許容引張応力を用いた『公式による設計 (Design by Rule)』ではなく、微小領域の応力状態や変形挙動を詳細に解析評価する『解析による設計 (Design by Analysis)』により設計・製作される。リスクベースメンテナンスによる長期使用プラントの信頼性向上の観点から、火力発電や石油化学プラントなどの非原子力分野でも『解析による設計』が導入されてきており、従来のクリープ破断データだけでなく、クリープ変形挙動を解析評価することの重要性が高まっている。

クリープデータシートプロジェクトでは、10万時間を超える長時間クリープ破断データだけでなく、長時間のクリープ変形データも取得している。2004年3月末の時点で、20万時間を超えてクリープ破断したものは27本、20万時間を超えて試験中のものは47本ある。その中で、1969年に開始したボイラ及び压力容器用炭素鋼鋼板 (JIS SB480) から採取した0.3%炭素鋼のクリープ試験が、2003年12月に30万時間に到達した。クリープ曲線をFigure 2に示す⁶⁾。クリープ試験条件は試験温度が400℃、応力は294MPaである。30万時間は約34年2ヶ月に相当し、試験機の改造に伴う1回の中断を除き、事故等による中断のない連続試験により30万時間を超えるクリープ変形データを我が国で初めて取得した。ドイツでもこれまでに4点の30万時間を超える長時間クリープ試験データが取得されており、それをTable 2に示す^{7,8)}。このように、30万時間を超えるような長時間クリープ試験データは世界的にも少ないため、今後はクリープ変形データについてもデータシートとして整理するとともに、データベース化を推進する計画である。

2.3 インターネットによるデータ発信

NIMSでは中期計画の重点研究開発領域のひとつとして、

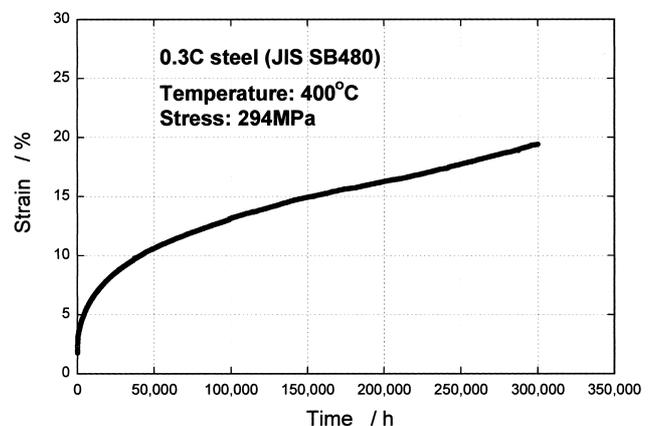


Figure 2 300,000 hours creep curve for 0.3% carbon steel plate for boilers and pressure vessels (JIS SB480)

*3 プロジェクト開始当時に試験対象とした44材種のクリープデータシートはNos.1~41に相当する。

研究基盤、知的基盤の充実が定められている。知的基盤充実の具体的課題として、物質・材料に関するデータベースの開発と外部への情報発信に取り組んでおり、2003年4月1日からNIMS物質・材料データベース⁹⁾としてインターネットを通じて公開している。公開しているデータベースはNIMSでこれまでに開発してきたものと科学技術振興事業団 (JST) から移管されたものに加え、クリープ及び疲労データシートの計11種類である。クリープと疲労のデータシートは構造材料データベースとして電子ファイル化され、インターネットを通じて閲覧が可能となっている。

本データベースの利用価値を高めるためにはデータベースの内容の充実を図るだけでなく、世界の主要な物質・材料データベースと連携し、相互補完することが重要である。そこで、Materials Database Network¹⁰⁾を運営するGranta Design社¹¹⁾と相互のデータベースを横断検索することができるシステムの共同開発を行い、2004年5月26日に両者のデータベースを接続させることに成功し、横断検索システムが完成した。Materials Database NetworkにはThe American Society for Metals (ASM)、National Physical Laboratory (NPL)、The Welding Institute (TWI)、National Institute of Standards and Technology (NIST) およびUK Steelなどの材料データベースとともにNIMS物質・材料データベースが接続され、約14万件の物質・材料データを横断検索することが可能となった。

3 今後の展開

3.1 新規材料

前述したように、プロジェクト開始当時に試験対象とした44材種のクリープデータシート作成計画は2004年3月ではほぼ終了した。しかし、プロジェクトを実施してきた40年近くの間には新しい高強度耐熱金属材料が数多く開発されている。そこで、今後需要が高いと思われる新規開発材料を選定・購入し、クリープデータシート作成のためのクリープ試

Table 2 Long-term creep data beyond 300,000 hours obtained in Germany^{7, 8)}

Material	Temp. (°C)	Stress (MPa)	Time (h)	Laboratory	Comments
X8CrNiMoNb 16-16	700	49	339,702 ruptured in 1993	Salzgitter Mannesmann	complete creep curve El:8.6%, RA:15%
0.3C-1.6Cr-1.3Mo-0.1V bolt steel	500	150	313,192 ruptured in 1979	IfW TU Darmstadt	interrupted creep test
GX22CrMoV 12-1	530	100	356,463 stopped in 2000	Siemens PG	continuous creep test creep strain:2.1%
X8CrNiMoNb 15-15	600	118	300,006 stopped in 1992	Siemens PG	continuous creep test

験を開始している。1988年以降、新規に試験対象とし、クリープ試験を開始した耐熱金属材料をTable 3に示す。フェライト耐熱鋼が12材種、オーステナイト耐熱鋼が4材種、Ni基超合金が5材種である。これらの新規材料の中には開発されてから日が浅く、使用実績が比較的少ないものも多い。新規開発材料の場合、使用実績の増加に伴い、わずかではあるが意図的に化学組成や熱処理条件等を変化させる場合があり、製造プロセス条件が変化する場合もある。そこで、これら新規材料の中でも特に需要が高い材料 (たとえば9Cr-1Mo-V-Nb鋼) については、時期をずらして材料を購入し、クリープ試験材としている。

ところで、クリープデータシートプロジェクトで試験対象としている材料は炭素鋼、フェライト耐熱鋼およびオーステナイト耐熱鋼などの鉄鋼材料と超合金である。ところが、日本機械学会に委託してデータシートユーザーのニーズ調査を実施したところ、Al合金やMg合金などの軽量非鉄金属材料についても、標準となるクリープデータの整備が求められていることが明らかとなった¹²⁾。欧米においても状況は同様であり、自動車等の輸送用機器を軽量化することを目的として、軽量非鉄金属の導入が活発に検討されている。そこで、本プロジェクトにおいても、Al合金やMg合金などの軽量非鉄金属材料のクリープデータシート作成を目的として、試験材料や試験条件、100~200°Cの比較的低い温度域におけるクリープ試験技術などの予備検討に着手している。

3.2 クリープデータブック

2.1節で述べたように、約1万時間までのクリープ破断データが得られた時点でデータシートの初版を発行し、その後3万~5万時間程度のクリープ破断データを取得した後、改訂A版を発行し、10万時間を超えるクリープ破断データを取得した後、最終版となるB版を発行してきた。しかし、前

Table 3 List of the materials subjected to creep test since 1988

Materials	Product form	Sampling year
2.25Cr-1.6W-V-Nb steel	tube, pipe	2002
2.25Cr-1Mo-0.25V steel	forging	2003
9Cr-1Mo-V-Nb steel	tube, pipe, plate	1988 - 2002
9Cr-2Mo steel	tube, plate	1988, 1990
9Cr-0.5Mo-1.8W-V-Nb steel	tube, pipe	1995, 1996
11Cr-0.4Mo-2W-Cu-V-Nb steel	tube, pipe	2000, 2001
18Cr-8Ni-Cu-Nb-N steel	tube	2002
18Cr-12Ni-Mo-low C-Middle N steel	plate	1990, 1995
18Cr-12Ni-Nb-Ti steel	tube	2002
25Cr-20Ni-Nb-N steel	tube	2002
IN 738-LC	casting	1997
Hastelloy X	bar, plate	2003
Inconel 718	bar, plate	2000, 2001

節で述べたように、需要の高い新規開発材料については時期をずらして材料を購入するため、今後は従来のスタイルでデータシートを発行することは困難になる。また、データシートは材種毎の分冊であるため、クリープ破断データを取得後、必ずしも速やかにデータシートとして公表できるとは限らない。そこで、今後はこれまでに発行したすべてのクリープデータシートを材料毎に4分冊程度のクリープデータブックとして集約し、新規に取得したクリープ破断データを定期的にまとめて追補版として提供する形態を検討している。早ければ2006年度以降には、現状のクリープデータシートに代わり、クリープデータブックを発行する予定である。

3.3 新しいデータシート

クリープ破断データを主体とするクリープデータシートは、今後はクリープデータブックとして集約する計画である。一方、これまでの38年間のプロジェクト活動を通じて、クリープデータシートとして公表してきたクリープ破断データ以外にも、貴重なデータやクリープ試験材が蓄積されている。そこで、今後はそのようなクリープ破断データ以外の情報を整理して公表していく計画である。以下ではそのような新しいデータシートについて述べる。

(1) 微細組織写真集

発電プラントのエネルギー効率向上のため、高強度耐熱材料の開発が求められているが、一方では、すでに20年あるいは30年以上の長期間にわたり運転された長期使用プラントの安全性を確保して、適切に寿命延長することも重要な技術的課題となっている。長期使用部材の経年劣化や損傷の程度を評価して、プラントの余寿命診断を行うためには、クリープ等の強度特性だけでなく、高温構造部材の微細金属組織を解析・評価することが重要である。そのため、長時間クリープ試験材の微細金属組織を系統的に解析し、高温での長期使用に伴う微細金属組織変化に関する材料情報を整備することが必要とされている。そこで、これまでにJIS SUS 304H TB (No.M-1, 1999)、JIS SUS 316H TB (No.M-2, 2003) およびJIS SUS 321H TB (No.M-3, 2004) の3鋼種について、クリープ試験材の微細組織写真集を作成し、発行している。今後はフェライト耐熱鋼も含め、需要の高い耐熱金属材料について微細組織写真集を発行していく計画である。

(2) 応力リラクセーションデータシート

応力リラクセーション試験は、温度と応力(荷重)を一定に保持するクリープ試験とは異なり、温度一定で変位(ひずみ)を一定に保持するために必要な応力の時間変化を調べるものであり、高温ボルト材などの強度特性を評価する重要な

ものである。プロジェクトの一環として耐熱金属材料の応力リラクセーション試験データを取得しており、これまでにJIS SUS 316-HP (No.42, 1996)、1Cr-0.5 Mo-0.25 V鋼と12Cr-1 Mo-1W-0.25 V鋼のボルト材 (No.44, 1997) およびJIS NCF 800H-B (No.47, 1999) について、応力リラクセーション試験データを掲載したデータシートを出版している。応力リラクセーション試験では、クリープ破断時間が極めて長時間になるような低応力条件下での材料強度特性を精度良く評価することが可能である。そのため、今後も需要の高い耐熱金属材料について応力リラクセーション試験データを取得し、データシートとして発行する計画である。

(3) クリープ変形特性データシート

クリープ現象が問題となるような高温では微細金属組織が大きく変化するため、クリープ強度は時々刻々変化する。そのため、クリープ強度特性を詳細に理解・把握するためには、クリープ破断強度だけでなく、試験時間の増加に伴うクリープ変形挙動そのものを評価・解析し、微細金属組織の変化と関連付けて検討することが必要である。また、30万時間クリープデータの項(2.2節)でも述べたように、高温構造部材の信頼性を高めるためには、有限要素法を用いた微小領域の応力状態や変形挙動の詳細な解析が求められている。そのため、クリープ破断強度だけでなく、クリープ破断時間が数十万時間あるいは百万時間を超えるような低応力条件下でのクリープ変形特性データの解析が必要である。

以上のように、クリープ強度特性をより詳細に解析するためにはクリープ破断データだけでなくクリープ変形特性を解析することの重要性が高まっている。そのため、これまでにプロジェクトで蓄積されたクリープ変形データを整理して、クリープ変形データシート(仮称)を発行する計画である。

(4) 溶接継手クリープデータシート

クリープデータシートはその大部分が母材に関するものであり、JIS SUS 304-HP (No.32A, 1995) が唯一、溶接継手に関するクリープ試験データを掲載したものである。溶接継手のクリープ強度特性評価には溶接金属や溶接施工法、試験片形状等の多くの要因を考慮する必要があり、母材の試験データに比べて評価対象が限定されてしまう問題がある。しかし、実機プラントにおける損傷や破壊の大半が溶接部で生じていることから、溶接継手のクリープ強度特性評価は実用上極めて重要である。そこで、NIMSで実施した溶接部の高温強度に関する研究で得られた知見¹³⁾を基に、ニーズに応じて試験データの充実を図り、溶接継手のクリープデータシートとして発行していきたい。実用上必要性の高い溶接施工法や試験片形状などを考慮し、今後はより積極的に溶接継手の

クリープ試験データを取得してクリープデータシートとして発行していく計画である。

3.4 規格への反映

クリープデータシートの長時間クリープ試験データは信頼性の高い標準参照データとして、許容応力の見直し等に反映されている。しかし、クリープデータシートとして発信している情報は基本的に試験データのみであり、引張強さや10万時間クリープ破断強度等の解析結果を記載してはいるものの、長時間クリープ強度特性の解析評価法等に関する検討は行っていない。長時間クリープ試験データはそれだけで貴重な情報ではあるが、今後はそのような貴重なデータを用いて長時間クリープ強度特性の最適な評価法を検討し、評価結果を提示することも必要であると考えている。1992年に設立されたEuropean Creep Collaborative Committee (ECCC : 欧州クリープ共同委員会)¹⁴⁾では、欧州規格の許容応力等を策定するために必要なクリープ強度特性を提示することを目的として、欧州各国の多数機関が共同でクリープ試験データを収集するとともに、その評価法等について検討を行っている。我が国においても、クリープデータシートのデータだけでなく、民間企業等で取得しているクリープ試験データ等をも集約して、クリープ強度特性の評価法を検討するとともに、許容応力の策定基準となりうる長時間クリープ強度特性の評価結果を提示していく活動が求められている。

4 おわりに

本稿では、クリープデータシートプロジェクトの現状と今後の計画についてその概要を述べた。火力・原子力発電プラントや石油化学プラントなどの高温構造部材の安全性・信頼性を確保するとともに、プラントそのものの性能を向上させるためには、耐熱金属材料の長時間クリープ強度特性を詳細かつ正確に把握することが必要である。しかし、民間企業が単独で数十年に及ぶ長時間クリープ試験を系統的かつ大規模に実施することは現実的に不可能である。クリープデータシートプロジェクトの立上げに際しては、日本鉄鋼協会の金材技研クリープデータシート連絡分科会(主査:東工大田中良平教授(現名誉教授))にて試験計画等を検討・立案していただきました。また、データシート懇談会やクリープ検討会等を通じて、官公庁、大学、企業、学協会等の多くの方々からご協力・ご支援を頂くことにより、40年近い長期間にわたりプロジェクトを推進することができました。今後とも、耐熱金属材料の設計・開発や製造に関わる関係者、高温構造部材を製造する材料ユーザー、各種高温プラントのエンドユーザーに加え、大学・研究機関等の研究者のご協力・ご支援を

受け、国家プロジェクトとして地道に長時間クリープ試験を継続することが重要であると考えます。皆様からの忌憚のないご意見・ご批判を賜りますとともに、今後とも関係各位のご指導、ご鞭撻を賜りますよう、宜しくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 金属材料技術研究所クリープデータシート作成の試験計画と試験技術, 金材技研材料強度データシート資料, 10 (1996), 20.
- 2) 伊藤 弘, 江頭 満, 宮崎秀子, 門馬義雄, 横井信: 長時間クリープ試験に使用したPR熱電対の劣化, 鉄と鋼, 72 (1986), 1944.
- 3) JIS Z2271-1999, 金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法, (1999), 10.
- 4) 太田定雄: フェライト系耐熱鋼, 叢書鉄鋼技術の流れ第1シリーズ-8, 日本鉄鋼協会, (1998)
- 5) 田中千秋, 八木晃一: 耐熱金属材料の10万時間クリープ特性の評価と高温クリープ研究の新たな展開, 鉄と鋼, 80 (1994), 255.
- 6) 木村一弘, 宮崎秀子, 横川賢二, 金丸 修: 炭素鋼 (JIS SB480) の30万時間クリープ変形特性, CAMP-ISIJ, 17 (2004), 467.
- 7) H. Diehl and J. Granacher: Ergebnisse aus Zeitstandversuchen bei 500°C mit einer Beanspruchungsdauer bis über 300000 h, Arch. Eisenhüttenwes. 50 (1979), 299.
- 8) T.U.Kern: Private communication, (2003)
- 9) <http://mits.nims.go.jp/>
- 10) <http://matdata.net/index.jsp>
- 11) <http://www.grantadesign.com/>
- 12) 平成15年度独立行政法人物質・材料研究機構委託調査研究報告書, NIMS材料データシート活動に関する調査 (NIMS材料データシートの有効活用促進と高付加価値化に関する提言), 日本機械学会, 技術開発支援センター, (2004)
- 13) 渡部 隆, 山崎政義, 本郷宏通, 田淵正明, 田辺龍彦: 9Cr-1Mo-V-Nb鋼溶接継手の長時間クリープにおけるType IV破壊と微細組織, 鉄と鋼, 90 (2004), 206.
- 14) D.V. Thornton: Activities of the European Creep Collaborative Committee, Proc. 5th Intern. Parsons Conf. on Advanced Materials for 21st Century Turbines and Power Plant, Cambridge, July 2000, A. Strang et al. eds., IOM London, (2000), 123.

(2004年7月5日受付)