材料を安全に使用するための情報と指針の整備 —材料リスク情報プラットフォームの開発—

八木 晃 一

物質・材料研究機構材料基盤情報ステーション

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 12 (2002), pp. 1264-1270
Special Issue on Materials and Technologies for Risk Society
© 2002 The Japan Institute of Metals
Overview

Construction of Information and Guideline for Safe Use of Materials —Development of Materials Risk Information Platform—

Koichi Yagi

Materials Information Technology Station, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047

To establish a safe society, it is necessary to secure the safety of products and systems and improve their reliability. However, it is impossible to produce perfectly safe products and systems. Recognizing the existence of these risks, consumers or users must select and use products and systems according to their own choices. The preparation of information and data concerning such risks will help users to know whether they are acceptable or not. For coping with such a risky society, engineering and technology based on consideration for risk are expected to progress. A study was conducted on this subject from the standpoint of material research, and the development of a materials risk information platform was commenced in 2001. This report describes the details of this platform development, the contents of the research, and the expected results.

(Received June 19, 2002; Accepted September 2, 2002)

Keywords: *risk, accidents, structural materials, acceptable risk, life prediction, materials risk information platform, materials development, materials reliability, equipment diagnostic system*

1. は じ め に

製品やシステムの安全性の確保、信頼性の向上は安全で、安心できる社会を作るために欠かせない。しかし、数多くの部品やサブシステムが組み込まれる製品やシステムでは不完全な部品やシステムが入り込むことがあり、また人間の操作にも完璧を期し難いことから、完全に安全な製品やシステムを作り、使うことは難しい。このため、われわれは多くの事故や災害を経験してきた¹⁾。そして、これらの事故の経験をもとに、事故を起こさないための規則や基準を作り、それに従って製品やシステムの設計や製造、使用が行われ、危機を回避するように対処してきた。

しかし、最近では、社会経済活動の国際化や規制緩和の流れの中で、これまでの国内でしか通用しない上意下達式の規則やルールによる硬直化した手法では対応できなくなっている。このため、技術分野のみでなく、社会のあらゆる分野で規制緩和に対応した危機回避のための方策作りやシステム作りが進められている。そして、安全・安心に関しては自らが自主的に対処することが求められつつある。このような状況では、自らリスクを認識し、部品やシステムを選択し、製品やシステムを使いこなしていかなければならない。

一方、材料が使用される環境も厳しくなっている。すなわ

ち、エネルギーを消費する機械やプラントでは使用温度を上げて高効率化が図られている。このため、そのような過酷な条件に耐える材料の開発が進められているが、開発される材料はその性能を限度まで引き出すように使うことが求められている。他方、既存の構造物やプラントにおいては、老朽化・高経年化が進んでおり、設計寿命を超えた使い方がされている。このように、製品や部品に使われている材料においては性能を存分に出した使われ方が求められている。しかし、材料強度特性や寿命は材料を構成する微量な添加元素や熱処理、加工によって影響を受け、正確な評価を行うことは難しく、得られた評価値は不確かさを持っている。このために、損傷や破壊が起こり得るとの認識のもとに材料を使うことが必要である。すなわち、材料を安全に使用するにはリスクを認識して使用することが必要であると考えられる。そこで、材料サイドから、今後のリスクを受け入れた社会に対応して何をなすべきかを検討した。この結果、安全な材料の選択や材料の安全な使用のために、材料に関わる必要なデータや情報が得られ、また、必要な解を求める手法に関する情報や指針が得られるシステムを作ることが必要であると考えた。そこで、2001年(平成13年)度から2005年(平成17年)度までの5年計画として、材料リスク情報プラットフォームの開発の研究を、物質・材料研究機構を中核とし、研究機関、学協会、企業の参加を得て開始した。

この報告は、その材料リスク情報プラットフォーム開発を始めるに至った経緯と、その研究で実施されている研究課題を紹介するとともに、開発によって期待される成果を述べる。材料リスク情報プラットフォームはあらゆる材料を対象として開発を進めることを原則としているが、これまでの情報の蓄積や開発予算とのかかわりから主として火力発電プラントの材料を対象として開発を進めている。

2. 事故に対する技術の対応—ASME の活動—

機械構造物での事故はこれまでに多発し¹⁾、われわれはさまざまな経験を積んできた。事故に対して技術者が何も対応してこなかったわけではない。むしろ、新しい技術に対する安全性を確保するための研究開発、安全な設計法の開発、製造技術の開発、試験法の開発、材料の開発、規格・基準作成などを行ってきた。高温機器の代表としてのボイラを対象に、米国機械学会(ASME)の活動を通して事故に対する安全性の確保、信頼性の向上を目指す活動について調べた²⁾。

19 世紀に米国、英国でボイラ事故が多発し、約 1 万件の事故が起こり、ほぼ同数の死者が発生したようである。このような状況の中で、1880 年 2 月 6 日、ニューヨークの事務所に 30 名の機械技術者が集まり、機械工学分野を発展させるために協会を作った。これが ASME の発端である。このように、ASME はアカデミーの場ではなく、ボランティアの技術者らによる民間の非営利団体として設立された。

1905 年、米国マサチューセッツ州での大きなボイラ事故が契機となり、ボイラの規則の制定が進み、1907 年にマサチューセッツ法ができた。この法律で、材料や部位によって使用圧力の上限が決められた。その後、米国各州での異なるボイラ規格を統一するための委員会が ASME に組織され、1915 年には設計および製作後の管理を主体とする基準(コード)が作成された²⁾。

その後、ボイラの運転温度や圧力の上昇とともにクリープ強度が問題となってきた³⁾。そして、1920 年代になるとボイラの高温化に伴って、金属材料の高温特性のデータが必要になった。この頃、金属材料の特性が高温でどう影響を受けるかが良く知られておらず、ASME-ASTM(米国試験材料協会)合同委員会が作られ、高温特性の調査や試験機の検討などが始められた。

当初、クリープは変形の問題と考えられたが、長時間後に破壊することが知られるようになり、破壊の研究とともに、クリープ破断試験も行われるようになった。このため、ASME 基準でのクリープに関する許容応力を決める場合に、クリープ変形とともに破断寿命からも検討されることとなった²⁾。許容応力を決めるときの安全率の取り方については、1950 年度版の ASME 基準で定まり、現在まで変化がない。この許容応力の考え方は歴史的・経験的に決まったものであり、必ずしも合理的であるとはいえないが、この方法で大きな事故が起こっていないことが変化していない理由と考えられる。しかし、規格基準のグローバル化とともに、欧州における安全率と米国・ASME の安全率に関する考え方や

値に違いが出てきており、合理的な安全率はどうあるべきか、そしてその値はいくつかなどの問題を再度考えることが必要な時代になっている。

3. 最近の火力発電プラントの状況

3.1 材料の使用条件の過酷化

わが国の火力発電プラントは戦後の電力需要の増大に応えるように伸びつづけ、1961 年頃には水力発電の発電量を上回り、「火主水従」となった。燃料から見ると、戦後は国内の石炭を使った石炭焼きボイラであったが、1955 年頃から石油焼きの大容量化が進められ、1973 年のオイルショック以降は LNG および海外炭による大容量火力発電プラントが主流となった。そしてさらに、最近では地球温暖化など地球規模での環境問題に対応して一層の効率化が求められるようになり、コンバインドサイクル発電プラントや超々臨界圧発電プラントなどの新技術開発が進められている⁴⁾。

わが国のボイラの蒸気条件(温度および圧力)の変遷をみると、戦後、欧米先進国の技術導入が図られ、ボイラの温度および圧力は上昇し、1960 年には欧米の水準に達した。その後さらに蒸気条件の上昇が図られ、1960 年代には超臨界圧ボイラが、そして 1990 年頃には超々臨界圧ボイラが運転され、最近ではさらに蒸気温度が上昇するとともに、より一層高温のボイラ開発が計画されている。

上記のような蒸気条件の上昇にはそれに耐える材料の開発が必要である。主要な耐熱鋼の開発は第 2 次世界大戦前に行われているが、それらが規格化され、広範に使用されるようになったのは戦後である。その後、徐々に開発は進められ、超々臨界圧ボイラが開発されるに伴って、近年、急速に材料開発が活発化している⁵⁾。材料開発への要求としては、初期の超々臨界圧ボイラがベースロード用として開発され、オーステナイトステンレス鋼が使用されたが、近年のボイラでは負荷調整機能が必要とされ、発停の繰り返しに強いフェライト耐熱鋼が必要とされている。このため、高 Cr フェライト耐熱鋼の開発が進められており、より一層の高強度の耐熱鋼の開発が欧州およびわが国で進められている。

3.2 設備の老朽化

わが国の工業プラント、橋や道路、建物などは高度経済成長時代頃から作られたものが多く、多くのものが老朽化しつつある。火力発電プラントも同様に 20 年以上使われているものが 3/4 もあり、約 80% の事業用ボイラは設計寿命の 10 万時間を超えている⁴⁾。しかも、火力発電プラントは設計時のベースロード使用から起動停止を頻繁に伴う負荷変動用に変わっており、これに対処するために 1980 年代に設備診断や余寿命予測の技術の開発が進められた。

3.3 新材料開発と課題

改良 9Cr-1Mo 鋼は米国の企業(Timken 社)で基本が開発され、さらにオークリッジ国立研究所(ORNL)で高速増殖炉用の構造材料として研究開発が進められた。高速増殖炉開発は停滞したが、この材料が優れた高温強度を有していること

から、火力発電プラント等の高温機器で使用されている。この材料はその後の高 Cr フェライト耐熱鋼開発のきっかけを与えた。

最近、この改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断強度が 1 万時間以上の長時間で、最小クリープ速度域の変形挙動から予測される値よりも急速に低下することが指摘された。そして、この低下の原因はオーステナイト粒界近傍での局所的な組織回復によると考えられている⁶⁾。

また、最近、長期間使用されたプラントの溶接部で Type IV 割れが発生している²⁾。これは溶接熱影響部の細粒域に生じる割れであり、高強度部分に囲まれた強度が低い部分に多軸応力が作用し、破断延性が低下するためである。このため、高強度化を求める今後の材料開発では Type IV 割れ対策は重要な課題である。

このように、高強度フェライト耐熱鋼の開発が今後ますます求められるが、この種の鋼では局所的な軟化相や低クリープ強度部分が長時間クリープ強度を支配することになることから、長時間の寿命予測法の開発、弱点相の検出技術の開発、弱点相を発生させない材質改善の研究が必要とされる。

4. 設計および保守管理での新しい潮流とリスク工学・技術の構築

安全な製品を作り、その製品を安全に使うためには、作るための規則や使うための規則、また保守管理ができていなければならない。製品設計においては、経験や実績に基づいて安全率が決められ、それに従って設計する手法、すなわち、規格・基準に従う設計 (Design by Rule) が行われてきた (Fig. 1)。しかしその後、過剰な安全率の無駄を省くために解析による設計 (Design by Analysis) の概念が導入された。すなわち、高温プラントでは、圧力容器の肉厚が厚く熱応力が大きい場合、Design by Rule では設計できなくなる場合があることから、運転モードや応力の種別毎に解析・評価する手法が取り入れられた。そして、今後はさらに、長期間の運転実績やトラブル事例データベースをもとに破損確率を考慮し、想定される被害を勘案したリスクに基づく設計 (De-

sign by Risk Base) が検討され始めている⁷⁾。

一方、製品を安全に使用するためには保守管理・設備診断が重要である。設備保全は、故障や破損の後に補修する事後保全と、使用経験の蓄積や設備診断技術の進歩に基づいて事前に対処する予防保全とに分類される。そして、予防保全は、さらに点検周期を事前に決めておく時間計画保全と設備診断を実施し、その状態に基づいて対応する状態監視保全とに分けられる。これら保全方式は状況や対応機器によって選択されるべきといわれているが⁸⁾、1980 年代から予防保全が取り入れられ、さらに今後は故障確率や被害の規模に対応して診断方法を選択するリスクベース診断へ移行すると考えられる。

従来の実績や失敗事例の蓄積、材料や設計、製造での知識の蓄積、解析技術の進歩、設備診断技術の進歩と経験などを踏まえて、損傷確率に基づくリスク評価から判断するリスクベース設計やリスクベース保守管理技術が指向され始めている⁹⁾。そして、すでに実施された事例が発表されたり¹⁰⁾、米国では米国石油協会 (API) や ASME から検査に関する基準やガイドラインが出されている。

このように、規制による安全管理よりも、自主的な判断に基づく安全管理が求められつつある。わが国においては、法律による規制は性能の規制にのみ限り、技術的な規格は業界自らと定めていくことが求められつつある (Fig. 2)。このための規格や基準作りには事故の経験や材料使用経験の蓄積が重要であり、また合理的な安全性解析技術の開発が必要である。そして、公開されているデータや情報を参考にしつつ、リスク評価を行い、受け入れ可能なリスクにすることができ材料、部品、製品、システムを選択できるようにすることが必要である。しかも、不幸にも事故が起きたならば、その情報はフィードバックされ、次の設計や保守計画に反映できるようにすべきである。このようなリスクに基づく工学・技術の考え方、すなわちリスクベース工学・技術の構築を創出することが今求められている⁹⁾。そこで、このリスクベース工学・技術を作り出すことを念頭に、材料サイドから何をすべきかを考えた。

Fig. 1 Change in design thought.

Fig. 2 Proposal of risk base engineering and technology.

Fig. 3 Procedure for risk assessment.

5. リスクマネジメント

リスクは、破損(被害)の発生する確率と破損(被害)の大きさの組み合わせとして評価される。リスクアセスメントとは、人、財産、社会、環境にリスクを与える潜在的なハザード(危険)を認識し、データや経験、観察や統計的な分析、解析により被害の発生確率を推定し、リスクを推定評価する分析作業である¹¹⁾。

リスク評価は Fig. 3 に示す手順に従って進められるのが一般的である¹¹⁾。すなわち、評価する対象の機器を選定し、そのシステムや部品に生じる破損や損傷の形態を推定する。その後、それぞれの部品での損傷形態(モード)に対応して破損確率を算定(評価)し、また被害の大きさを見積もる。これらの評価をもとにリスクマトリックスを作成し、評価したリスクが許容できるレベルかを判断する。許容できないとなれば、リスク低減の方策を施し、再度評価し、許容できるレベルまでリスク低減の対応策を施す。しかし、最後にはどうしてもなくすることができないリスクが残る(残留リスク)。この残留リスクについては、リスクとして受け入れ、トレーニングや防護機器を設置して対処することになる。

6. リスク評価で材料が対応すべき課題

Fig. 3 に示したリスクマネジメントの手順に従って製品(プラント)のリスク評価を行う場合に、どのような材料の課題があるのかを検討した。なお、この場合に、研究の対象は限定し、対象を火力発電プラントのボイラ関連(主蒸気管を

含む)とした。

リスク評価すべき重要機器やシステムの選定、破損・損傷の推定の段階では、機器の使用状況報告や破損・事故事例データベース、材料強度や材料破壊に関する知識ベースなどが破損モードの推定や損傷メカニズムの推定に必要である。

破損の発生確率を評価する段階では、材料特性のばらつきも含めて特性を定量的に表示できる情報や、寿命予測などの解析手法についての不確かさの情報が得られること、また損傷を検査するための設備診断技術の有効性とその不確かさ、さまざまな運転状況(例えば、荷重変動)に対応した破損寿命への影響の程度を推定する方法など、不確かさの情報も含めた損傷・破損解析に関する知識やデータが必要である。一方、破損に伴って起こる被害の大きさの評価では、破壊の形態が漏れ程度なのか、噴出するような割れなのかなど破損の仕方(破損モード)を評価するための情報が必要である。また、この被害の大きさの受け取り方は社会や経済の状況などさまざまな要因が関与する。このため、被害の大きさの評価では、社会との関わりについての知識や情報も必要である。

これらの評価結果をまとめてリスクマトリックスに表示し、そしてリスクが許容できるか否かを判断する。この段階では、リスク低減のための対応策としての代替材料の提案に必要な材料データベース、代替検査法を提案するための設備診断技術データベース、寿命予測法などの知識や情報が必要である。

このようにリスクベース設計やリスクベース保守管理を構築するためには、材料サイドとして努力しなければならない課題は多い。Table 1 はこれらの課題をまとめたものである。この表では、これらの課題がどのような領域の視点からされるべきか、すなわち材料の研究(M)、設計と関連させた材料の研究(D)、プラントの使用・運転と関連させた材料の研究(S)としてされるべきかも示した。損傷メカニズムを推定するための事故事例データベースや寿命予測の高精度化、設備診断技術の高度化などは現状の工学・技術体系でも重要な課題である。しかし、リスクベース工学・技術ではリスクの評価・分析のために定量的な情報やデータが求められること、完全な定量的な情報でなくともリスクマトリックス表示ができ、比較検討ができる情報が求められることを認識することが重要である。そして、評価のあいまいさを低減させるためには、データベースや解析方法、評価方法の開発で精度を高めるとともに、それぞれの方法での不確かさを理解し、その程度を提示できるようにしなければならない。

7. 材料リスク情報プラットフォームの開発

工業技術に絶対の安全はない。安全で安心のできる社会では、ユーザー自らがリスクを選択することが必要である。そこで、材料研究の立場から、リスク目標値に対して安全な材料を選択し、材料を安全に使用するために支援ができ、指針が示せる材料リスク情報プラットフォームの開発を提案し、2001 年(平成 13 年)度から開発を進めることとなった。このプロジェクトでは、情報が集められやすいこと、かなりの知識が蓄積されていることなどを考慮し、対象を火力発電プラ

Table 1 Subjects of materials research needed for risk evaluation, and view of research; M: materials, D: design and S: service.

1	Presentation on damage mechanism and failure mode under every service conditions	(a)	Construction of database on accident cases and used cases of materials	M, D, S
		(b)	Construction of database on microstructures and damage modes (photograph)	M, S
		(c)	Accumulation of knowledge and information on materials strength	M, D, S
2	High accuracy of life prediction	(a)	Development of life prediction method including probability and uncertainty	M, D, S
		(b)	Construction of materials database which is quantified including data-scattering	M
		(c)	Clarification of relationship between life and damage modes	M, S
		(d)	Clarification of effect of change in service condition on failure life	D, S
3	Development of simulation technique of damaged and fracture	(a)	Development of simulation technique considering the scattering of materials property and change in service condition	D, S
		(b)	Graphics based on simulation	D, S
4	High accuracy of equipment diagnostic technique (maintenance technique)	(a)	Classification of diagnostic technique and quantification of its ability	S
		(b)	Damage evaluation by diagnostic technique, including uncertainty	S
		(c)	Life prediction based on damage evaluation by diagnostic technique, including uncertainty	S

Fig. 4 Constitution and research subjects for development of materials risk information platform.

ントのボイラとした。Fig. 4は、このプロジェクトの主な構成と実施体制である。このプロジェクトは、鈷物質・材料研究機構(NIMS)を中核として、鈷電力中央研究所(CRIEPI)、鈷日本鉄鋼協会(ISIJ)、鈷日本高圧力技術協会(HPI)、鈷米踏科学技術協会(SNTT)、鈷三菱総合研究所(MRI)、三菱重工業鈷(MHI)が参加して進めている。

このプロジェクトで実施すべき課題を抽出するためにTable 1に示した研究課題を分析した。この結果、対応すべき分野として、研究の課題を2分野に分けてまとめることにした。すなわち、材料そのものに関連する課題分野と製品の設計や使用・運転に関連した材料の課題分野である。

材料に関連する研究課題としては、材料の破損・損傷事例を蓄積するための事故事例データベースの構築、実験室で実施した試験から得られた試験片のミクロ金属組織変化および破損・損傷モードをデータベース化する金属組織・損傷写真集の作成、実規模での部材の寿命に影響する因子を解明し、その影響を定量化する研究、また材料の長時間クリープ寿命予測を高精度化する研究である。

Fig. 5 Performance of materials risk information platform.

製品の設計・運用に関連した材料の研究課題としては、材料の欠陥や損傷を検査し、その情報をもとに寿命評価するための助けとなる設備診断支援システムの開発、表面仕上げなどの寿命へ影響する因子を加味した極限環境での材料強度データベースの構築、さらに材料強度値を算定するために必要な寿命予測法の予測性能の比較検討、安全率の合理的設定の検討と許容応力データベースの構築である。

先に記述したように、リスクの大きさには社会の受け取り方が大きく影響する。そこで、リスクの視点から材料と社会との関わり、また技術と社会との関わりについて調査研究することにした。

これらの各研究成果はプラットフォームに集められ、最適な材料の選択や最適な材料の使用法に関する情報が得られる情報源にする。この機能を受け持つのがメインシステムである。このプロジェクトに関係する機関の間には相互に情報のやり取りができるようにリンクが張られる予定である。そして、メインシステムの開発も含めて、各課題の研究が進められ、2003年(平成15年)度には関係機関で内部的情報のやり取りが行われるようになり、2005年(平成17年)度の研究終了時には外部に情報公開できる材料リスク情報プラットフォーム(Fig. 5)として完成する計画である。

この材料リスク情報プラットフォームからは、受容できるリスク値を得るために、どのような材料を選択し、どのよう

Fig. 6 Solution expected from materials risk information platform.

に使うべきか、また維持管理のための設備診断はどうすべきか、どのような寿命予測法を使うのが適切かなどの指針を得るための基本的な情報や知識(Fig. 6)が得られる計画である。

この材料リスク情報プラットフォーム開発の研究では、事事故例データベース構築、材料安全性解析技術の開発、合理的検討を踏まえた安全率に基づく許容応力データベースなどが提示できる予定である。これによって、限られた内容ではあるが、リスクベース工学・技術の構築(Fig. 2)へ向けての第一歩を踏み出すことができるであろう。

8. リスクベース工学・技術に対応した材料開発のあり方

Fig. 7 は、物質・材料研究機構(前金属材料技術研究所)が1967年から実施してきているクリープデータシート作成プロジェクトで得られた改良 9Cr-1Mo 鋼(T91)¹²⁾と 9Cr-1Mo 鋼(STBA 26)¹³⁾のクリープ破断試験結果をバンドで示したものである。改良 9Cr-1Mo 鋼は 3 ヒートの結果、9Cr-1Mo 鋼は 11 ヒートの結果であり、ヒート数の多少に違いがあるものの、ばらつきの大きさはヒート数にのみよるのではなく、以下のような化学成分の規定条件の違いによるのではな

Fig. 7 Creep rupture strength of Mod. 9Cr-1Mo steel(T91) and 9Cr-1Mo steel(STBA26).

いかと考えられる。両鋼の化学成分の規定値(必要条件)と試験対象ヒートの分析値の幅を比較した(Table 2)。改良 9Cr-1Mo 鋼では 12 元素の成分量が規定されているが、9Cr-1Mo 鋼では 7 元素が規定されているのみである。また、改良 9Cr-1Mo 鋼の方が微量元素の規定値が若干厳しい。この化学成分の規定の厳しさが、改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断強度のばらつきを小さくすることに寄与したと考えられる。

リスク評価では寿命予測を実施する場合に、手法やデータに不確かさが入り込む余地が少ない方がよい。このためには、材料強度や寿命に影響する因子を明らかにし、それらに影響する因子、例えば化学成分や成分規定値をできる限り明確にすることにより不確かさを減少させることができる。すなわち、材料から入り込む不確かさを減らすことが可能になれば、リスクを下げる 것이可能となり、規格以上にしっかり作りこまれた高性能の材料を使うことの優位性が出てくる。

9. 今後の材料信頼性研究のあり方

通常、金属材料のクリープ変形挙動は遷移・定常・加速クリープ域で構成されると教科書に書かれているが、実用鋼は

Table 2 Chemical composition of Mod. 9Cr-1Mo steel (T91) and 9Cr-1Mo steel (STBA26).

Mod. 9Cr-1Mo (T91)

Heats		Chemical composition (mass%)												
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Al	N	Nb
Requirement		0.08~ 0.12	0.20~ 0.51	0.30~ 0.51	< =0.020	<0.010	< =0.40	8.00~ 9.50	0.85~ 1.05	—	0.18~ 0.25	< =0.04	0.030~ 0.070	0.06~ 0.10
Measurement	3	0.09~ 0.10	0.29~ 0.38	0.35~ 0.45	0.009~ 0.015	0.001~ 0.002	0.12~ 0.28	8.51~ 8.70	0.90~ 0.96	0.022~ 0.032	0.205~ 0.22	0.001~ 0.02	0.042~ 0.050	0.072~ 0.076

9Cr-1Mo steel (STBA26)

Heats		Chemical composition (mass%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	N
Requirement		< = 0.15	0.25~ 1.00	0.30~ 0.60	< = 0.030	< = 0.030	—	8.00~ 10.00	0.90~ 1.10	—	—	—
Measurement	11	0.09~ 0.13	0.34~ 0.86	0.38~ 0.50	0.014~ 0.028	0.002~ 0.016	0.07~ 0.12	8.46~ 9.15	0.93~ 1.05	0.02~ 0.08	0.002~ 0.013	0.0154~ 0.023

このような単純なクリープ変形挙動ではない。クリープ中、マイクロ組織の変化は絶え間なく起こり、このマイクロ組織変化が変形挙動や破壊形態に影響を与える¹⁴⁾。このようなマイクロ組織の変化が行き着き、平衡状態のマイクロ組織になったときにフェライト耐熱鋼のクリープ強度は初期の組成や構造に依存しない基底クリープ強度に達する¹⁵⁾。この基底クリープ強度に達するには長時間を要する。特に最近開発されたフェライト耐熱鋼ではマイクロ組織変化が押さえられているため長時間を要する。このため、多くのフェライト耐熱鋼の場合、設計寿命である 10~20 万時間ではまだ基底クリープ強度に達せず、過渡状態であることが多い。

このように、耐熱鋼は複雑なマイクロ組織変化が起こっている過渡状態で使われている。そして、高温下での耐熱鋼のクリープ変形はマイクロ組織の変化の影響を受け、特に低応力条件ほどマイクロ組織の変化の影響を受けやすく、そのクリープ変形挙動が破断寿命に影響する。また、低応力条件では局所的に形成される弱化相が破断寿命を支配する。このため、高応力、短時間の試験データをもとにした寿命予測では良好な予測は得られない。このため、長時間クリープでの変形や寿命に影響を与える因子を明確にし、マイクロ組織変化や損傷の形成・成長、さらに局所的に形成される弱化相の存在も考慮して変化する要因を取り入れた寿命予測法の開発が必要である。

しかし、それでも微量な化学成分の影響、熱処理の影響、加工処理の影響、初期マイクロ金属組織の効果、クリープ中でのマイクロ組織の変化とそれに伴うクリープ変形挙動や損傷様式への影響などの各種の因子を記述し、それらの影響を完璧に強度や寿命に表現できる評価式を開発することは難しいであろう。今後の信頼性研究は強度や寿命に対する重要な影響因子の定量化に関する研究をさらに進めるとともに、これらの影響因子の効果が評価できないために生ずる不確かさの部分の寄与の効果も定量的に表現することができる構成式や寿命予測法の開発に向かうべきであると考えられる。これによって、不確かさが定量的に示すことができるようになれば、リスク評価の説得力が増し、リスク工学・技術の確立に向けた貢献が進むであろう。

10. お わ り に

安全で安心できる社会を構築することが求められている。しかし、科学技術の成果の利益を受けるためには、その一方でリスクの受容も要求される。そこで、受け入れることがで

きるリスク目標値を自ら定め、その目標値に対応した製品やシステムをユーザー自らが選択できるように、技術の側から情報を提供できるようにすることが必要である。このようなリスク受容社会においては、材料開発や材料信頼性研究もリスクベース工学・技術に対応できるように発展させなければならない。ここでは、このための挑戦として平成 13 年度から始めた研究プロジェクト「材料リスク情報プラットフォーム開発の研究」の基本的な考え方、そして取り組みを紹介した。リスクベース工学・技術の構築の進め方は従来の進め方と大きく異なるのではなく、重要なことは、従来進めてきた事業をさらに前進させ、使用事例(事故事例)を蓄積していくこと、不確実性を認識し、より定量化を進めた安全性解析技術を開発していくこと、そしてこれらのもとになるデータや情報を公開し、ユーザーが判断できるようにすること、さらに、ユーザーが中心になって必要な規格や基準を準備していくことを支援できることである。開発を進めている材料リスク情報プラットフォームが、今後のリスクベース工学・技術の進展に寄与できるように努力していきたい。

文 献

- 1) A. Tsuji: *Handbook on Safety*, (Maruzen, Tokyo, 2002) pp. 805-813.
- 2) K. Yagi: *Metals & Technology* **70**(2000) 1078-1082.
- 3) W. Cross: *The Code, An Authorized History of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, (ASME, 1990) p. 77, pp. 93-96, p. 119, p. 125, p. 149.
- 4) The Thermal and Nuclear Power **55**(2000) 263-292.
- 5) F. Masuyama: Report of the 123rd Committee on Heat-Resisting Metals and Alloys, Japan Society for the Promotion of Science **38**(1997) No. 3, 211-226.
- 6) H. Kushima, K. Kimura and F. Abe: *Tetsu-to-Hagane* **85**(1999) 841-847.
- 7) M. Higuchi: *Journal of Japan Society for Safety Engineering* **39**(2000) 150-158.
- 8) The Thermal and Nuclear Power **51**(2000) 492-623.
- 9) H. Kobayashi: *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers* **103**(2000) 449-451.
- 10) A. Fuji, M. Yatomi, H. Eguchi, C. Fukuoka, Y. Okatsuka, S. Kihara, D. Worswick and B. Browne: *Journal of High Pressure Institute of Japan* **39**(2001) 60-67.
- 11) T. Matsumoto: *Risk Assessment Technique for Safe Design*, (New Technical Development Center, 1997) p. 1.
- 12) *NRIM Creep Data Sheet No. 43*, (National Institute for Materials Science, 1996).
- 13) *NRIM Creep Data Sheet No. 19B*, (National Institute for Materials Science, 1997).
- 14) K. Yagi: *Journal of the Japan Society for Simulation Technology* **15**(1996) 3-13.
- 15) K. Kimura, H. Kushima, K. Yagi and C. Tanaka: *Tetsu-to-Hagane* **81**(1995) 757-762.