

# プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年2月20日

評価委員：（敬称略、五十音順）

生駒俊之 東京工業大学 大学院理工学研究科 材料工学専攻 准教授  
 坂本浩一 株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 所長  
 鈴木隆之 (株)日立製作所 インダストリアルプロダクツビジネスユニット  
 電機プロダクト設計部 担当部長  
 辻 伸泰 京都大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 教授  
 南二三吉 大阪大学接合科学研究所 副所長（教授）

確定年月日：平成29年4月18日

プロジェクト名	エネルギー関連構造材料の信頼性評価技術の研究開発
研究責任者の所属・役職・氏名	木村一弘 材料信頼性評価ユニット長
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>構造材料の信頼性に関する研究はこれまでも継続して実施されてきているが、構造材料の損傷・劣化が要因となった事故等は減少せず、近年では事故の規模が拡大し、それに合わせて事故の影響度も増大している。その理由は、材料の使用環境が苛酷になるにつれ、設計マージン（安全率）の低減や長寿命化が求められるとともに、高経年化あるいは老朽化した社会インフラが年々増加し、それらの安全性・健全性確保および寿命延長が求められているためである。</p> <p>(1) 高効率化・高性能化：材料の使用環境が苛酷化（短寿命化）                  (2) 長寿命化・高性能化：高精度特性評価による限界設計（低マージン化）                  (3) 高経年化・寿命延長：余寿命評価による健全性評価</p> <p>上記の理由から、材料信頼性研究に対するニーズはますます高まるとともに、従来技術の単なる延長ではなく、従来技術の限界を打破するための革新的な材料信頼性評価技術の開発が求められている。そこで、従来の材料科学的アプローチを見直し、ナノテクノロジーを活用して物理や化学等のサイエンスの視点から材料特性に及ぼす実使用環境の影響を検討し、実構造物で問題となる時間変化量が極めて微小（ナノスケール）な動的現象（ダイナミックナノ）を解析・評価・予測する技術を開発し、その損傷メカニズムを解明する。また、腐食や摩耗等の界面が関与する化学的あるいは物理的特性についても、極微小な変化量の動的現象の解明を目指す。これにより、従来の統計学的確率論に基づく信頼性工学の限界を打破し、ダイナミック・ナノサイエンスに基づいた信頼性科学を開発して、構造材料の信頼性向上に貢献することを目的とする。</p>
研究内容	<p>実構造物で問題となる時間変化量が極めて微小な動的現象を解析・評価・予測する技術を開発し、その損傷メカニズムを解明することを目的として、下記の具体的な検討課題を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 耐熱材料の低応力クリープ機構の解明</li> <li>2. 動的荷重下における変形・損傷機構の解明</li> <li>3. 構造材料の水素脆化挙動評価に関する研究</li> <li>4. 階層的3D4D解析手法に基づくSCC（応力腐食割れ）機構の追究</li> <li>5. 照射下における応力・腐食重畳環境での材料劣化の研究</li> <li>6. 動的ナノ解析・非破壊評価技術の開発</li> </ol>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 最長50万時間程度までの長時間クリープ変形特性の予測技術を提案する。</li> <li>2. 内部破壊過程の支配因子を求め、モデリングと定式化を行う。</li> <li>3. 水素脆化特性評価を行い、材料および環境固有の最大値を求める方法を提案する。さらに、中性子散乱を用いた水素の存在状態解析手法を創出する。</li> <li>4. SCCき裂の発生、伝播機構、臨界マイクロ組織条件を定量的に提示して、耐SCC性を向上する組織制御手法を構築する。</li> <li>5. 照射と応力の複合的照射環境下における力学特性劣化挙動の評価・予測手</li> </ol>

	<p>法を提案する。</p> <p>6. 超音波疲労進展のオンラインモニタリング技術、多結晶体の微小領域における塑性崩壊と局所変形・ひずみ分布の計測技術、劣化損傷の非破壊検出による余寿命評価技術、量子化デバイスによる高感度センサーを開発する。</p>
平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)	<p>1) 主な研究成果(アウトプット)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・10万時間クリープデータによる検証に基づき、実験で評価不可能な、超長時間クリープ変形特性の予測を可能とするクリープ構成を開発した。</li> <li>・内部き裂の発生及び進展挙動を可視化する技術を開発することにより、内部微小き裂の進展寿命を求めるための力学モデルを構築して、疲労強度の予測式を導出した。</li> <li>・各種高強度鋼の水素脆化発生に及ぼす水素量の影響を明らかにするとともに、環境からの水素侵入挙動の理解を深めた。</li> <li>・応力腐食割れ(SCC)自動試験装置やX線CT等の新しい装置を活用して、非破壊によるSCCき裂の3次元可視化技術を開発し、耐SCC性の向上にとって望ましい微細金属組織と組織制御手法を提案した。</li> <li>・応力腐食割れ(SCC)は、溶接金属組織中のオーステナイトフェライト相境界に生成する孔食を起点とし2相境界を選択的に伝播する経路が重要であることを明らかにして、SCC発生から進展に至る臨界孔食径を算出する評価モデルを提案した。</li> <li>・材料の超音波や電磁気応答といった非破壊検査手法を用いてロケットエンジン燃焼器、FR等の構造材料を対象に、センサーデバイス、計算機シミュレーション、実構造物の評価法を開発した。</li> </ul> <p>2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリープ強度に及ぼすNiの影響に関する知見が国内規格に反映された。</li> <li>・開発した高温超音波疲労試験装置を中心とした超音波疲労試験方法が本年中に日本溶接協会の規格として採用される見込みである。</li> <li>・破断応力の水素量依存性及び環境からの水素侵入を考慮した水素脆化評価法が日本鋼構造協会のガイドラインとしてとりまとめられた。</li> <li>・応力腐食割れ(SCC)によるき裂進展挙動の4次元解析を可能にしたことにより、SCCの評価技術や材料の耐SCC性の向上に資する。</li> <li>・溶液への水素添加が照射下効果を抑制することから、水の放射化による酸化化学種が照射下SCCに影響を及ぼす可能性を見出した。</li> <li>・当初計画にはない鉄筋コンクリート構造物の劣化損傷検出等の成果を得た。</li> </ul>
プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価	<p>プロジェクトの目標の達成度合い：大きな成果を挙げており目標を十分上回った。</p> <p>自己点検・評価 プロジェクト開始当初の目標を達成するとともに、当初の計画を超える多くの研究成果を取得するという大きな成果をあげており、目標を十分上回った。また、本プロジェクトの研究成果の一部は学術的な領域に留まらず、種々の規格・基準に反映されることにより、すでに社会実装されていることから、本プロジェクトの研究成果が材料信頼性の向上に貢献する意義及び波及効果は多大であると自己評価する。</p>
【評価項目】	コメント
①研究計画、実施体制、マネージメント、連携(事前・中間評価の結果を	・目的としている「構造材料の実使用環境下におけるクリープ、疲労、水素脆化、応力腐食割れ(SCC)等の動的現象に対する材料信頼性評価技術の開発」は、まさに社会の要請とNIMSの強みに合致したものであり、極めてよいテ

<p>受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか)</p>	<p>ーマ設定である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究計画・実施体制の設定共に最適で、多くの研究成果を挙げている。</li> <li>・ ロードマップ、実施体制は十分である。</li> <li>・ エネルギー関連構造材料というターゲットが明確且つ結果の積み重ね、データベース化が重要となる研究に対し、長期視点でロードマップを策定して計画的に実行された。</li> <li>・ 構造材料の実使用環境下でのクリープ・疲労・水素脆化、SCC の評価手法の構築に向けて、年度毎の明確なロードマップを策定し、計画的に研究が展開されている。</li> <li>・ 最終ターゲット達成に向け、技術基盤を構築しながらレベルアップしていく取組みも評価に値する。</li> <li>・ クリープ、疲労、水素脆化、応力腐食割れなど、時間依存型の構造材料の破壊挙動をターゲットとして、種々の解析・評価技術の開発を目指している。</li> <li>・ 特に超長時間特性を対象とした戦略とマネージメントは明確である。</li> <li>・ 東日本大震災をうけ、変化する社会ニーズに対し、実施内容を修正して進めているマネージメントも評価に値する。</li> <li>・ テーマ間の連携も十分に行われ、マネージメントにも優れ、エネルギー関連材料において多くの情報発信が行われた。</li> <li>・ 各サブテーマとも、評価手法を標準化・規格化して社会実装することを意識しており、その連携意識が種々の規格・基準、ガイドラインの作成につながっていると評価できる。</li> <li>・ JAEA（日本原子力研究開発機構）など外部との連携も実施されている。</li> <li>・ 外部資金も多く獲得できており、外部からの評価が高いことを示していると推察される。</li> </ul>
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 (目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 当初目的は十分達成されている。</li> <li>・ クリープ強度のヒート間差に関する解析では、製造プロセスの違いによる、Cr などの偏析が原因であることを見出しており、当初目標を上回る成果が得られている。</li> <li>・ ただしサブテーマによっては、従来手法を用いてやや個人的な興味の研究を行ったように見えるものもあり、プロジェクト全体として、説明者が強調された「計画を超えた進展」とまで言えるかどうかはやや疑問である。</li> <li>・ 社会インフラなどに対する材料信頼性において、極めて高い社会的価値のあるプロジェクトであった。</li> <li>・ 規格・ガイドラインとしてまとめられた本研究成果は、実使用環境下での構造物の維持管理面において、大いに意義のある成果と判断される。</li> <li>・ 本プロジェクトで得られた成果はメカニズム解明等、学術的な成果に留まらず、規格・基準に反映されており、実用化、実装化、材料信頼性の向上への貢献という面できわめて高く評価される。</li> <li>・ 外部機関（企業、大学、・・・）との共同研究等による外部資金獲得額も運営費交付金の予算を超えるレベルとなっており、外部からの客観的な評価も極めて高いことを示している。</li> <li>・ 環境強度の評価手法の研究は、これまで実験データベースのものがほとんどであったが、本研究によって高強度鋼のギガサイクル疲労や脆化のメカニズムが解明され、科学的な評価モデルの構築につながっている。</li> <li>・ 特に実環境下の挙動と、加速試験下の挙動の差を、常に意識しながら評価に組み入れている。</li> <li>・ 超長時間クリープ強度特性の評価が可能で構成式確立、ギガサイクル疲労のき裂の進展メカニズム、SCC き裂の非破壊 3D 観察、照射下 SCC 機構のモデル化など目標を達成し、実製品評価および規格・基準へ活用が可能となった。</li> <li>・ クリープ、水素脆化、超音波疲労試験などの成果は種々の規格やガイドラインへの展開も図られており、社会的価値の創造につながっていると思われる。</li> </ul>

<p>③研究開発の進捗状況  (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各テーマともに計画を超える成果が得られている。</li> <li>・NIMSの研究力が強い長時間クリープ強度試験など、世界的に見て断トツの研究開発の進捗であった。</li> <li>・特に長時間クリープ、ギガサイクル疲労などは世界トップであり、かつこれらを規格、基準に反映させているなど、成果は多大である。</li> <li>・長時間クリープ、ギガサイクル疲労、照射下 in-situ 評価は世界的に見ても貴重なデータ取得が出来ており、継続的なデータ取得とメカニズム解明が期待される。</li> <li>・新しく開発したナノビーチマーク法によりギガサイクル疲労挙動を解析可能とした成果は特筆すべきものであると思われる。</li> <li>・微小亀裂進展や水素拡散挙動の可視化技術の開発は、この分野の研究を従来になく視点で展開させている。</li> <li>・材料損傷の可視化技術によって、高強度鋼のギガサイクル疲労のメカニズムが解明されたことは、世界的にも画期的な成果といえる。</li> <li>・そのほかにも複数の優れた知見が得られている。</li> <li>・国内会議および国際会議で数多くの招待講演がなされており、世界的に注目を集める成果が得られている。</li> <li>・出口をしっかりと見据えた研究および技術開発が行われた一方、構造材料の材料科学に対する基礎的・学術的な寄与はやや弱いように感じられる。</li> <li>・予算も外部資金の獲得が進められ、将来の新しい研究につながる成果も得られている。</li> </ul>
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト)  (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・200件を超える学術論文と規格・基準に反映される知見を得たことは大きな成果である。</li> <li>・207件の学術雑誌論文、164件の国際会議プロシーディングス論文、50件の解説・総説論文が著されている。</li> <li>・256件の招待講演がなされており、十分な影響力を有していると思われる。</li> <li>・特許出願31件、特許登録9件なども行われている。</li> <li>・学術論文に関しては、国際ジャーナルへの投稿などを増やすと、更に効果・効用が高まると期待できる。</li> <li>・十分な量であるが、国際会議プロシーディングよりも学術雑誌論文文化に力を入れた方が良い。</li> <li>・安心・安全な社会の共通技術基盤として、今後も大きな波及効果が期待できる。</li> <li>・特に9Cr-1Mo改良鋼が規格範囲内においてもクリープ強度が劣化するケースがあることを見だし、これが材料製造方法に起因する偏析帯の影響であることを明らかにして、材料規格に反映させていこうとする取組みは、極めて重要であり、今後期待したい。</li> <li>・解析・評価に関するプロジェクトでは国内外の規格を提案・確立することが大切で、これら規格立案も十分に行われており、本プロジェクトの波及効果は極めて優れていた。</li> <li>・規格化などを通じた波及効果の大きさが、このプロジェクトの特徴的成果である。</li> <li>・研究成果を論文として公開するだけでなく、標準化・基準化して規格、ガイドラインの作成に繋げたことは、社会的な意義が高い。</li> <li>・構築された環境強度評価手法・技術を逆展開することにより、環境に強い構造材料の研究開発につながるものと期待される。</li> <li>・継続的な研究、データ取得および信頼性向上に向けたメカニズム解明、評価式の構築をお願いしたい。</li> <li>・若手の育成が急務であろう。</li> </ul>
<p>総合評価点平均  (10点満点)</p>	<p>9.0点 (小数第二位四捨五入)</p>

<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料の信頼性評価技術の開発はまさにNIMSのコアとなる取組みであり、引き続き、競争力の維持・強化に努めていただきたい。</li> <li>・社会の安全を確保するために極めて貴重な分野である。</li> <li>・材料の評価・予測から、材料物性を迅速に予測できる技術開発につながることを期待する。</li> <li>・産・官・学もこれをしっかり支えていく必要がある。</li> <li>・プロジェクト発足の直前に震災があり、プロジェクトの方向性が若干修正されたが、効率よく成果を出すことに成功している。</li> <li>・社会変革が急速に進む現代社会において、このような柔軟性がプロジェクトには必要であり、高く評価できる。</li> <li>・長時間クリープ試験に関しては、昨今では世間受けはしないかもしれないが、世界的にも貴重な活動として是非とも継続していただくことを願う。</li> <li>・高い信頼性の長時間域のクリープデータを得ていることはNIMSの強みといえる。</li> <li>・今後もこの分野の研究を精力的に続けていただきたい。</li> <li>・試験データの更なる積み重ねを含めて、継続的な研究をお願いしたい。</li> <li>・供用下の実構造物の環境強度評価への実証研究へと是非、展開していただきたい。その場合、溶接・接合部の挙動が律速する可能性があり、是非、溶接・接合部の環境強度評価手法の研究開発にもつなげていただきたい。</li> <li>・ギガサイクル疲労の支配因子が発生初期の内部亀裂進展速度であることを見出している。その支配パラメータとして微小き裂面積を提案されているが、パラメータの妥当性を検証する研究につなげていただきたい。</li> <li>・また、今後はクリープ疲労評価についても果敢にチャレンジしていただきたい。</li> <li>・溶接部が対象ということで超音波疲労試験方法を日本溶接協会規格(WES)として制定見込みとあるが、JIS化することは考えないのか。</li> <li>・先にWES化してしまうと、場合によっては今後JIS化する際に、手順上の問題を生じることがある。</li> <li>・実験結果および提案された解析・評価法が規格等に成果を反映出来ている。</li> <li>・また、実験結果・データが取得されているという重要性も主張すると良いと感じた。</li> </ul>
---	--

### 第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		