

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：平成25年12月11日

評価委員：（敬称略、五十音順）

潮田浩作 新日鐵住金（株）技術開発本部 フェロー

落合庄治郎 京都大学構造材料元素戦略研究拠点 副拠点長

丸山公一 東北大学名誉教授

山本真人 （一財）電力中央研究所材料科学研究所 上席研究員

確定年月日：平成26年2月5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
研究責任者の氏名・所属・役職	木村一弘 材料信頼性評価ユニット長
実施予定期間	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、それに併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"> 1. 耐熱材料の低応力クリープ機構の解明 2. 動的荷重下における変形・損傷機構の解明 3. 構造材料の水素脆化挙動評価に関する研究 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 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 6. 動的ナノ解析・非破壊評価技術の開発
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"> 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。 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。 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。 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。 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

	<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>
<p>平成23年度～平成25年度中間評価時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>	<p>1) 主な研究成果（アウトプット）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・改良 9Cr 鋼のクリープ強度のヒート間差が長時間域で増大するのは、有害相である Z 相の析出成長と MX 強化相の消失を Ni が促進するためであることを明らかにし、世界で初めて、改良 9Cr 鋼の低 Ni 材に高い許容応力を設定した日本機械学会発電用火力設備規格（2012 年版）の技術的根拠を提示した。 ・ギガサイクル疲労では、非金属介在物等を起点として材料内部でき裂が発生、進展する。そこで、周期的にき裂進展挙動を変化させ、その痕跡を形成させることにより、内部き裂進展挙動の定量的可視化に成功した。 ・引張試験により変形後、定変位で保持し水素チャージする手法を開発し、変形のひずみ速度依存性が水素脆化感受性に及ぼす影響を明らかにし、高マンガン TWIP 鋼では静的ひずみ時効による強度の増加が水素脆化による破壊寿命の支配因子であることを明らかにした。 ・塩化物存在下におけるステンレス鋼の SCC き裂を X 線 CT により、非破壊で 3D 観察することに世界で初めて成功した。汎用性の高い X 線源を用いているため、ステンレス鋼の SCC のき裂・進展についての 2 次元的・3 次元的構造情報がサンプルを破壊することなく、従来よりも簡便に得られるようになった。 ・316 鋼では照射下で母相に比べてデルタ相が選択的に酸化され、応力照射下では母相とデルタ相境界に沿って皮膜割れが発生することを明らかにした。 ・液体窒素中に超音波疲労試験片と超音波ホーンを設置して、疲労試験片の振動をレーザ振動計で検出し、高調波等の非線形超音波及び AE 信号を解析して疲労進展挙動を非破壊で評価する技術を開発した。 <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> <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、クリープ、疲労、水素脆性、応力腐食割れ及び照射誘起応力腐食割れに関する研究を進めるとともに、それらの現象解明に貢献するための非破壊評価技術の開発を推進した。その結果、各サブテーマにおいて損傷メカニズムに関する新知見の取得、従来技術では解析できなかった内部疲労き裂進展の定量解析技術や応力腐食割れの非破壊による 3D 解析技術等を開発するとともに、規格化・標準化に貢献する成果も蓄積している。これらの成果を基に研究を推進することにより、エネルギー関連構造材料の信頼性向上に資する更なる成果が期待できる。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況： ほぼ計画通り進んでいる。</p> <p>自己点検・評価： いずれのサブテーマも計画通り確実に研究成果を挙げており、現時点では最終目標の達成に対する特段の障害は認められない。したがって、現時点での進捗状況は、ほぼ計画通り進んでいる。平成 25 年度の補正予算により、最終的には「大幅に進展」を目指す。</p> <p>今後のプロジェクト遂行に対する大きな課題は、人材と研究設備に関するものである。定年制職員が不足していることに加え、平成 24 年度末に 2 名が定年を迎え、平成 25 年度末と 26 年度末にも各 1 名の職員が定年を迎えるため、計画的な人材確保が急務である。クリープ試験設備の目黒地区からつくば地区</p>

	への移設は平成 23 年度末に完了した。サイクロトロン施設の維持管理体制の構築が必要である。
【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・この研究は、長時間クリープ強度、疲労破壊、水素脆化、応力腐食割れ(SCC)、照射誘起応力腐食割れなど、社会基盤の安全・安心と深く関わり、その解明が強く求められている事項を研究テーマとしている。 ・信頼性評価技術を開発し、規格・基準あるいは標準化への応用、展開を提示することを目指して、6サブテーマを設定し、各テーマに年度毎に到達目標を決めて、研究を推進している。 ・研究開発の方向性、目標、計画、体制は妥当であり、特に問題はなく、ほぼ計画どおりの成果を得ており、そのなかには事前評価での評価委員の要望や指摘に応える内容も含まれている。 ・研究開始前のヒアリング結果に対応した変更により、現実的かつ有益な結果が期待されるプロジェクトとなっている。 ・東日本大震災後の社会のニーズ変化に柔軟に対応した目標の設定がなされている。 ・研究開発の方向性と目標は絞られており明確である。今後の研究開発の方向性も妥当である。ミッションの理解も良い。 ・構造健全性評価が必要とされる対象を広く俯瞰した上で重要なテーマが適切に選択されている。 ・チーム内の有機的な良い連携による新知見の獲得に加え、評価方法の確立・流布や国際標準化に向けて関連機関や産業界と連携が図られ、更には国際連携も意識して実行されている点も良い。 ・研究進展、標準化に向け、国内・国外機関との積極的な連携や共同研究を行い、成果を得ていることも評価される。 ・不得意分野を他機関連携で補い、予定された期間内に成果を創出する体制が整っている。 ・研究目的における「動的現象」はキーワードであるにもかかわらず定義が明確でない。非正常現象と誤認される恐れがある。
<p>②研究開発の進捗状況及び進め方 (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・研究はサブテーマ毎に、概ね計画通り順調に進捗している。 ・いずれのサブテーマも、要員および予算に見合った積極的な研究進捗状況であり、高く評価できる。 ・主な研究成果概要や発表論文、会議収録、招待講演リストから、各グループとも計画したクリープ、疲労、水素脆性、応力腐食、照射誘起損傷などのデータ取得・知見の集積、評価法開発など、計画通りに、ほぼ順調に研究を進めてきたといえる。 ・サブテーマ1は日本機械学会規格の改定に連携し、その技術的根拠を与える研究成果となっており、産業界への寄与の点で高く評価できる。 ・事前評価結果に対する対応表によると、「低応力クリープとギガサイクル疲労の機構解明とその共通性について検討を進めた結果、両者には本質的なレベルで共通性が認められる」との興味深い発見が記されている。クリープ、疲労などさまざまな環境での動的損傷を包括する学問の開拓に繋がる可能性がある。今後の継続研究では、重点項目として研究を進展させてほしい。 ・次の成果が高く評価される。— クリープ損傷機構の解明に基づいて材料を限定し、その材料については、従来より高い日本独自の許容応力を設定した。ギガサイクル疲労領域で内部き裂進展挙動を可視化するこれまでに類の無い技術を開発した。水素脆化による破壊の寿命支配因子を明らかにした。X線CTによるSCCき裂の非破壊3D観察に世界で初めて成功し

	<p>た。疲労き裂の非破壊評価AE（アコースティック・エミッション）技術を開発し、極低温超音波疲労損傷進展の評価を可能にした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料を安全に使うための規格化、標準化に大きく貢献している。特にクリープデータは、質量ともに世界最高で、世界的に高く評価されている。ギガサイクル疲労の分野でも、世界で最も多くの情報（論文）を発信している。 ・補正予算の有効活用も既に具体的に実行されており良い。 ・補正予算の獲得により重要テーマの加速的実施が実現されている。 ・研究責任者の自己点検・評価は妥当である。 ・今後の進め方についても具体的に焦点を絞った計画が検討されており、また課題の抽出もできており、妥当と考える。 ・チーム全体としての有機的連携を図り、成果を挙げている点も良い。今後は、黒田チーム（「低炭素化社会を実現する耐熱・耐環境材料の開発」プロジェクト）との連携も期待される。 ・サブテーマ4はX線解像度に左右されるき裂先端の判定、結晶粒界の判定、閉口き裂の扱いなど、今後の研究計画においては中間評価時点までと異なる研究展開が必要であり、かつ戦略の難易度が高いため、早期の計画詳細化が必要と思われる。
<p>③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト） （研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティー、ほか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・クリープの研究およびデータ化においてNIMSは世界をリードしてきた伝統がある。本プロジェクトでもクリープ研究の国際競争力の強さは明らかである。 ・基礎的なクリープの分野は、これまでと同様、外部から見たNIMSの基幹的な研究分野であり、重要性が高い。本研究における成果は国内火力発電所の健全性評価と合理化の観点から価値が高い。 ・実使用環境下での長時間クリープやギガサイクル疲労でのき裂進展、HIC（水素誘起割れ）などに関して貴重な新知見を獲得していることは特筆される。 ・損傷メカニズムに関する基礎的研究、データ集積、解析・評価・予測技術の開発などにおいても、質の高い研究を行っている。 ・クリープや損傷メカニズムに関する成果は、直接的にはエネルギー関連材料の信頼性向上に寄与するが、手法やコンセプトは構造材料全般の信頼性向上研究などへの波及効果も見込める。 ・研究成果を多くの論文としてまとめ、また標準化の検討もされており、本分野を世界的にリードし世界トップレベルに位置づけられる点は評価できる。 ・研究成果を論文、発表として発信しており、招待講演、受賞などでも評価されている。 ・特許も10件出願し、登録も進めている。国際競争力の強化に資するように、今後は基本知見の更なる知的財産化（論文、口頭発表、プレス発表、特許、標準化）を期待したい。 ・規格、標準化でも、質の高いデータを基に今後も世界をリードしていくことを期待している。 ・ニーズに直結した成果、近い将来に産業界への貢献が期待できる成果となっており、産業界において貴重な成果になっている。 ・個別テーマに関しては、産業界との連携を更に深め、実用化に向けたスピンアウトの可能性も検討してほしい。 ・国際交流も積極的に実施しているが、さらに国際交流に積極的に取り組み、成果を海外に発信し続けてほしい。

<p>④総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全体的にテーマが良く絞られており、計画も具体的である。 ・ 適切かつ積極的な研究展開がなされており、高く評価できる。 ・ 全体として、データ取得・知見の集積、評価法開発など、ほぼ計画通りに成果を挙げている。 ・ 広くチーム内で連携できる体制が構築されており、計画通りの進捗が得られた点は高く評価できる。 ・ データベースの基盤となる材料データでは、試験技術を確立しバラツキの少ないデータを得ることがその信頼性につながる。NIMSでは、そのような高い質のデータを収集してきたが、それは試験に従事する研究者、技術者の修練のたまものである。この様なノウハウを次に受け継げるような人材の配置が強く望まれる。 ・ 本プロジェクト全体としての最終目標の再認識と目標達成のためのシナリオを全メンバーで共有化し、チーム一丸となり推進することも重要であろう。 ・ 今後計画されているメカニズム解明、評価法提案などに期待する。 ・ 今後も実環境下での現象の把握と機構解明、および評価技術の確立に関して新知見を獲得し、学理を更に深化させ継続して世界をリードすることを期待したい。 ・ 10万時間を遙かに超える長時間のクリープ、ギガサイクル疲労などは、科学として未解明な部分も多い。これらの部分で、実用面に加えて、学理の発展への貢献も希望したい。 ・ 我が国の国際競争力の強化に資するように、新知見に基づいた基本特許の確保や標準化について継続して注力することを期待したい。 ・ 個別テーマ毎に産業界との連携を深め、可能ならスピナウトし、実用化を促進することも期待したい。 	
<p>各委員の総合評価点 (10点満点)</p>	<p>10、8、8、9 (順不同)</p>	
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>8.8 (小数第二位四捨五入)</p>	
<p>評価点</p>	<p>評価</p>	<p>評価基準</p>
<p>10</p>	<p>S</p>	<p>全ての点において模範的に優れている。</p>
<p>9</p>		<p>計画を変更することなく推進すべきである。</p>
<p>8</p>	<p>A</p>	<p>総合的に優れている。</p>
<p>7</p>		<p>一部計画を見直し推進すればS評価になる可能性がある</p>
<p>6</p>		<p>平均的なプロジェクトである。</p>
<p>5</p>		<p>プロジェクトの実施は認めるが、一部計画を見直した方が良い点がある。</p>
<p>4</p>	<p>B</p>	<p>期待されたほどではない。</p>
<p>3</p>		<p>計画を見直して推進すべきである。</p>
<p>2</p>	<p>C</p>	<p>大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきである。</p>
<p>1</p>		<p>プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更がなければ実行すべきではない。</p>