

平成19年度クロスオーバー研究の年次評価結果について

1. 評価実施の経緯

平成16年度から開始されたクロスオーバー研究の評価に当たっては、評価者とプロジェクトリーダー（以下「PL」）をはじめとする被評価者との継続的な議論の積み重ねが、今後の研究開発を効率的・効果的に進めていく上で重要であるという観点から実施している。研究開発の進捗状況を勘案し、また研究実施者に過剰の負荷とならないよう配慮し、今後のよりよい研究に繋がるような自由な意見交換の機会として2月に研究評価WGを開催した。

2. 評価の基本方針

クロスオーバー研究は、検討会による研究テーマの設定及びPLの指名によるトップダウン方式の研究制度であり、選定された2テーマはともに、既往の知見の確認ではなく、実験データの不足している未踏領域への外挿とその体系化という極めて挑戦的な研究である。

したがって、その研究評価にあたっては、国際的先導性の観点に立ち、最新の知見に基づいて研究の意義を明らかにするとともに、技術のブレークスルーや創造的技術の創出につながる、質の高い優れた研究を効率的・効果的に推進し、研究活動の活性化を図ることがその主眼となる。

また、その一方で、限られた研究資金の重点的、効率的配分を図るとともに、広く国民の支持と理解を得るため、評価内容を被評価者はもちろん一般国民に対してもわかりやすく提示することも、このような重点的研究の評価においては重要な観点となる。そのためには、評価者と被評価者との建設的な議論も重要な評価の成果であると考え、することも大切である。

クロスオーバー研究の評価に当たっては、以上について留意して、目標に向けての研究が効率的・効果的に行われているかの評価に加え、研究全般の高度化のための方策などに資する助言等を付与することに主眼を置く。

3. 評価実施テーマ及び実施時期

3-1 評価実施テーマ

- (1) 低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析
- (2) 照射・高線量領域の材料挙動制御のための新しいエンジニアリング

3-2 実施時期

平成20年2月15日（金） 13:30～16:00（第6回WG）

4. 評価結果総評

クロスオーバー研究「照射・高線量領域の材料挙動制御のための新しいエンジニアリング」、「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」の2テーマは、ともに（1）本質的に複雑な事象の予測・外挿という極めて困難な課題への挑戦、（2）不確実性を内包する課題についての現実的な問題解決方策の提案という2つの特徴を有している。こうした複雑で不確実性のある困難な課題への挑戦には、プロジェクトチームとしての問題解決への執念、緻密で柔軟な思考、斬新な構想、組織力・実行力、粘り強い試行錯誤等が要請される。

今回の評価に係る両プロジェクトリーダーからのヒアリングでは、ともに国際ワークショップの開催と研究の進捗状況の説明を中心に行われた。研究の開始から間もないということはあるが、ヒアリングでの議論を通して、プロジェクトリーダーのリーダーシップの努力が認められる。

今後とも両テーマにおいては、プロジェクトチームに参画する研究機関・研究担当者間のより一層の連携を図り、クロスオーバー性を発揮することによって、新たに得られた科学的な事実の確認と今後の研究開発の方向を示唆する解釈を準備しつつあり、最終的な目標へのブレークスルーをもたらすことが期待される。

また、研究の実施に当たっては、プロジェクトチーム内のみならず、国際的な視野にたった連携を図ることによって、海外の同様な研究を推進している研究グループと密な連絡をとりながら、効率的・効果的に研究を推進しつつある。

今回のWGでは時間的な制約もあり、分担者全員との学術的な深い議論が十分にはできていなかった。最終年度はWG委員とクロスオーバー研究参加者とのきめ細かい議論を実施し、研究実施者側と評価者側との徹底的な議論と、そこでの意見等を踏まえた研究の総括が範例となり、原子力研究全般の深化、高度化、活性化、さらには国際的なリーダーシップの獲得に繋がることを期待する。

<添付資料>

中1 総合所見シート「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」

中2 総合所見シート「照射・高線量領域の材料挙動制御のための新しいエンジニアリング」

中間評価・総合所見シート

研究テーマ名（プロジェクト名）： 低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析 （小野 哲也）	
研究参画機関名：（独）放射線医学総合研究所、近畿大学、東北大学、（独）理化学研究所、国立医薬品食品衛生研究所、（独）日本原子力研究開発機構、国立感染症研究所、（財）環境科学技術研究所	
項 目	要 約
1. 研究テーマの概要	<p>高レベル放射線が人体に有害であることについては膨大な情報の蓄積があるが、低レベル放射線の人体影響に関しては、その本格的検討が緒についたばかりである。そのため、現時点では、低レベル放射線のリスクは高レベルでの影響を直線的に外挿して評価されており、不確実性を内包している。今後の原子力・放射線利用の展開を考えると、科学的根拠に基づいた放射線防護指針が必要であり、その基盤として低線量放射線リスクの評価が求められている。</p> <p>以上のような状況を踏まえて、本プロジェクトでは8研究機関、11グループの参加を得て、以下の項目について研究を推進する。</p> <p>（1）マウス個体および培養細胞を用いて突然変異、染色体異常、あるいは遺伝子発現変化を指標として低線量放射線の影響を評価する研究。</p> <p>（2）低線量放射線と化学物質との複合効果に関する研究。</p> <p>（3）放射線の作用を修飾する要因に関する研究。</p> <p>（4）DNAの損傷あるいは修復を対象としてコンピュータシミュレーションによる放射線影響のモデル化に関する研究。</p> <p>これらの研究により、低線量放射線のリスク評価に資する情報とともに、外部からの「ストレス」に対する生体の応答という基礎科学として興味深い情報が得られるものと期待される。</p>
2. 中間評価 (1) 【必要性】 ・ 目的・目標の妥当性 （目的・目標の見直しの必要性） ・ 独創性、新規性	<p>[必要性] 「低レベル放射線についての適正なリスク評価の基盤となる生物学的情報の提供」という目標は、今後の放射線と人間との関わりの中で重要な課題である。この目標自体は妥当であり、見直しは必要ないと思われる。ただし、残された研究期間（1年）を視野に入れつつ課題の整理・絞込みならびに、得られた成果に基づく今後の課題の抽出・整理も検討すべきであろう。</p> <p>[独創性、新規性] 興味深くかつ重要な成果が得られつつある。</p> <p>1. 低線量率γ線（バックグラウンド線量率の約10倍、10 x 20 倍及び 10 x 20 x 20 倍）で 483日あるいは401日にわたって照射したマウス（集積線量はそれぞれ約20、400及び 8000mGy）を用いて、染色体異常、突然変異誘発、遺伝子発現等についての情報が蓄積しつつある。当該試料は世界的に見ても類のないものと評価できる。</p> <p>2. 計算機を用いたモデリング手法による「クラスター損傷」（狭い範囲に集中して生じる損傷）の生成量の予測に関する成果は重要である。今後、クラスター損傷の生成の線量効果関係と線量率効果を解析することによって、現状の放射線防護の基本的な考え方とされている直線しきい値無しモデル（LNTモデル）の妥当性の検証につながるものと期待される。</p>
(2) 【効率性】 ・ 研究手法（進め方の見直しの必要性）	<p>[研究手法] 研究手法、特に実験的研究とモデリングとを組み合わせるというアプローチは妥当であり、見直しの必要性はないと考えるが、ややもすれば「乖離」しがちな両者の融合を常に意識</p>

<ul style="list-style-type: none"> ・ 年次展開 ・ 連携体制 ・ 予算配分 ・ その他研究交流（国際的展開等） 	<p>し、研究を進められたい。</p> <p>[年次展開]</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 3つの低線量率で長期間照射したマウスを用いた研究成果が得られつつある。特に、高線量率照射との比較による線量率効果の評価や、ヒト培養細胞を用いた解析は、最終的な目標であるヒトにおける低線量・低線量率放射線の健康リスクの評価に向け、大きな前進であると思われる。 2. 薬剤と放射線の複合効果については、効果が増強される場合（指標は点突然変異頻度）と相殺される場合（染色体異常頻度が指標）のあることが明らかとなった。現実の生活の中におけるリスクを考える際には重要な知見である。 3. 炭素線マイクロビーム照射装置を用いて、直接照射された細胞とバイスタンダー細胞のp53タンパク質のリン酸化を比較したところ、後者ではtime lag が検出され、反応が遅いことがわかった。 <p>[連携体制]</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 環境科学技術研究所の低線量率放射線照射施設で長期間にわたり照射したマウス試料を、分担研究者が手分けして解析するという点での連携は高く評価できる。 2. 今後、動物実験を担当するグループと、ヒト培養細胞を対象とした研究を進めるグループ、さらにはモデリングを担当するグループの一層の連携により、研究の相乗的な進展を期待する。 <p>[予算配分]</p> <p>予算漸減の中、適正な予算配分が行われているものと認める。最終年度を迎えるにあたり、ゴールを見据えつつ重点的に取り組むべき課題の選別とこれに対する重点的な予算配分を検討する必要があるだろう。</p> <p>[その他]</p> <p>国外の関連分野研究者との連携は良好と評価できる。過去3年間で培ったコネクションを活用し、より効果的な情報交換や意見交換が行われたものと認められる。</p>
<p>(3) 【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 目標達成時における科学的意義 ・ 目標達成時における他分野、一般社会への波及効果 	<p>[科学的意義]</p> <p>生物が放射線に対して、積極的に応答していることが明らかになるものと期待される。このような応答の機構を明らかにすることができれば、放射線という枠を越えて、広く生体のストレス応答の理解につながるものと考えられる。生命活動の本質に迫る課題と言えよう。</p> <p>[波及効果]</p> <p>低線量放射線のリスク評価につながる情報が得られれば、放射線のより合理的な規制への反映が期待される。また、一般国民が微量の放射線に対して抱いている過剰な不安感を軽減・払拭することができるものと期待される。原子力発電を含めた放射線の利用に関する理解を得る上で波及効果は大きい。このためには、得られつつある成果を規制関係者などの非専門家や一般にも理解しやすい言葉で発信する必要がある。</p>

<p>(4)【クロスオーバー性】</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究の効率化、成果の相乗効果 プロジェクトリーダーのリーダーシップ 	<p>[研究の効率化、成果の相乗効果]</p> <p>マウス個体を用いた研究とヒト培養細胞を用いた研究の相乗効果により、最終目標である低線量・低線量率放射線のヒトにおける健康影響評価に資する実証的な情報が得られつつあるが、残された1年間でどこまで到達できるか、注視したい。</p> <p>[プロジェクトリーダーのリーダーシップ]</p> <p>プロジェクト開始後ほぼ4年を経過して、具体的なデータが出始めた。プロジェクトリーダーは分担課題の内容を統合的に把握した上でリーダーシップを発揮し、ゴールを見据えた取りまとめを行われたし。</p>
<p>3. 研究テーマの高度化に向けての留意点・アドバイス等</p> <ul style="list-style-type: none"> マウスとヒトにおける放射線に対する応答の異同につき詳細に検討されたい。これにより、マウスにおけるデータを利用できる事象と、ヒトにおけるデータが必要な事象が明らかになり、今後の研究計画策定に役立つものと考えられる。 脾臓細胞における染色体異常、肝臓や小腸幹細胞における突然変異などの指標ごとに有意な増加が認められる線量/線量率が異なることが明らかとなりつつある。ヒトの健康リスク評価において、それぞれの指標がどのような意味を持つかを議論し、今後どの指標に重点を置くかを検討されたい。 	
<p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> 低線量・低線量率放射線への応答における「個体差」が明らかとなりつつある。本研究プロジェクトの範囲を越えるものと考えられるが、ヒトにおける「個人差」にもつながる重要な課題と思われる。今後の課題として整理して頂きたい。 本プロジェクトの成果は、最終的には専門家のみならず、国民に広く知らしめるべきものである。理解しやすい情報発信についても、今のうちからその準備を進められたい。 2008年2月15日の年次成果ヒアリングに際し、「このプロジェクト研究の成果で、LNT仮説の是非をどこまで論じ得るや？」とのコメントがあった。 超低線量率の実験に関しては、より高い精度の結果を得る方策を工夫されたい。 	
<p>5. 総合評価</p> <ul style="list-style-type: none"> 長期照射したマウス試料ならびにヒト培養細胞を用いて興味深い成果が得られつつある。アウトプットとしての発表論文数も45編を数え、全体としては、着実に研究が進んでいるものと評価できる。 分担研究者間の連携が強化され、効率的に研究が推進されていると認められる。特に、マウスにおける研究成果とヒト細胞における研究成果との比較・検討は評価できる。 これまでに得られた成果を、最終目標である「ヒトにおける低線量・低線量率放射線の健康リスク評価」へ向けどのようにtranslateしていくかを念頭において研究を進める必要がある。 	
<p>評価責任者氏名： 岩田修一</p>	

中間評価・総合所見シート

研究テーマ名（プロジェクトリーダー名）： 照射・高線量領域の材料挙動制御のための新しいエンジニアリング (木下 幹康)	
研究参画機関名：日本原子力研究開発機構、東京大学、北海道大学、（財）電力中央研究所、九州大学、大阪府立大学他	
項 目	要 約
1. 研究テーマの概要	本研究の目的は、燃料セラミックス材料がもっている自己修復する力、すなわち組織を本来の安定な配列に戻したり、新しい安定な形を作ったりする機能(自己組織化)の数学的な定式化(モデル)を見出すことにあり、このモデルを物理的な実験によって検証することにある。さらに、この現象を予測する技術の開発を目指す。本研究では、実験科学、計算科学、応用数学などを総合して研究を進める。加速器シミュレーションによって核分裂で生じる事象を調べ、第一原理計算と分子動力学計算による準安定な複合欠陥の情報とあわせ、上記組織変化の主構造を探索する。さらに予測に用いる計算コードを開発するとともに、その予測手法を、発電所現場における新技術の導入や、現場での開発研究に適応するための検討を行う。
2. 中間評価	[必要性] 今後予想される原子燃料の高燃焼度化では、燃料セラミックス (UO ₂) の微細組織変化、特に体積変化をもたらす結晶細粒化と、粗大化した希ガス気泡形成に対する予測技術の開発が重要である。 本研究では、この照射下の細粒化を予測する機構論的な材料ふるまい解析コードの開発と、加速器シミュレーション手法の開発とを目標にして、その前提となる原子論的なふるまいの再現（実験と解析）に注力している。
(1) 【必要性】 ・ 目的・目標の妥当性（目的・目標の見直しの必要性） ・ 独創性、新規性	[独創性、新規性] 燃料の照射化の微視的構造変化を加速器実験と計算シミュレーションを組み合わせるという新しいアプローチである。加速器による複合照射実験によってセリア (CeO ₂) で重結晶の形成を確認し細粒化の再現の見通しを得、また計算では酸素が関連する複合クラスターの新しいふるまいを見出すなど、興味深い重要な成果が得られている。
(2) 【効率性】 ・ 研究手法（進め方の見直しの必要性） ・ 年次展開 ・ 連携体制 ・ 予算配分 ・ その他研究交流（国際的展開等）	[研究手法] 実験では加速器による細粒化の再現と、電子顕微鏡に加えて放射光やラマン散乱などを用いて格子欠陥構造の同定を試み、計算では第一原理計算と加速分子動力学法によりイオントラックや酸素挙動を調べており、進め方はおおむね妥当である。今後まとめるにあたっては、前回の評価でも指摘したが、基礎的メカニズム、現象論、工学的な意義それぞれをどこまで明らかにしたかを、わかりやすくする工夫が必要である。 [年次展開] ロードマップをもとに6つのサブグループで前半3年間と後半2年間で重要なマイルストーンをもうけて進めており、実験と計算の両方で特色ある成果が得られてきている。積み残されている課題も少なくないが、本来時間と手間のかかる課題が多いので、実験と計算で新しく見出した成果を相補的に組み合わせることにより全体像に迫ってほしい。 [連携体制] 幹事機関を日本原子力研究開発機構とし、電力中央研究所、東京大学、北海道大学、九州大学、大阪府立大学、で連携して進め、国際ワークショップ開催などにより国内外専門家の協力も得て進めている。それぞれの研究手法を活かして重要な成果が得られている。まとめの年度にはさらに連携を強めて燃料セラミックスにおける組織変化、細粒化の機構を整理し、燃料における工学的な特性変化のしきい値の考察まで進めてほしい。 [予算配分] おおむね妥当と考えられる。

	<p>[その他]</p> <p>連携機関以外との交流も積極的に行われている。新クロスオーバー研究合同シンポジウムを開催し一般向けの講演も行い、また第4回国際ワークショップでは内外の産業界の報告を含めて有効な交流が行われている。</p>
<p>(3) 【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目標達成時における科学的意義 ・目標達成時における他分野、一般社会への波及効果 	<p>[科学的意義]</p> <p>高線量照射のもとで、多原子固体のセラミックスについて微細組織変化と細粒化が進むプロセスとそのメカニズムが明らかになれば、照射効果の理解が大きく進むと考えられる</p> <p>[波及効果]</p> <p>本研究では、加速器照射実験と計算シミュレーションを組み合わせ燃料セラミックスの照射挙動の予測を目指している。この方法を発展させて、将来の高燃焼度化で燃料の細粒化の予測と制御が可能になれば、原子炉の長期サイクル運転や使用済み燃料体数の低減などに見通しあるシナリオを描ける可能性がある。非線形現象の予測が可能になれば、多くの分野への波及が期待される。</p>
<p>(4) 【クロスオーバー性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究の効率化、成果の相乗効果 ・プロジェクトリーダーのリーダーシップ 	<p>[研究の効率化、成果の相乗効果]</p> <p>理論的研究と実験的研究を組合せ、複数の理論手法および加速器と原子炉実験の相乗効果をねらっている。計算科学分野では東大、電力中央研究所、北大が連携してUO₂とCeO₂の第一原理計算等を実施している。実験分野においては、特に加速器照射実験でクロスオーバー性が活かされ、核分裂片のエネルギーを持つイオン種を照射できる原子力機構の施設で照射した試料を電中研、九大、東大に分配し各機関の得意とする装置を用いてそれぞれ分析や別施設による追加照射試験を行うなど効率的に連携している。さらに高エネルギー研と原子力機構の放射光実験にも取組んでいる。</p> <p>[プロジェクトリーダーのリーダーシップ]</p> <p>業績と経験ともに十分であり、専門分野の知見をもとに理論と実験をまとめる努力をしている。まとめの段階では実験、計算の各グループのより主体的な考察を引き出すことも有効と考えられる。</p>
<p>3. 研究テーマの高度化に向けての留意点・アドバイス等</p> <p>イオントラックと電子励起の実験的、理論的解析を進めるとともに、酸素過剰や雰囲気の影響、また力学的拘束など実燃料における因子の検討も有用と考えられる。</p>	
<p>4. その他</p> <p>最近の原子炉構造材料の照射実験研究やモデリング研究の進展、また核融合炉材料の照射研究における成果、を参考にすることも有効と考えられる。</p> <p>過去の燃料照射研究の蓄積を活かし、工学現場との交流を深めることが、将来的にも重要と考えられる。</p> <p>成果の発表を今後とも進めてほしい。</p>	
<p>5. 総合評価</p> <p>高線量領域での未解決課題へのチャレンジとして価値がある。模擬実験と計算シミュレーションを基にした解析コードを開発して、核燃料の高燃焼に伴って生ずる新しい組織(細粒化、リム組織)の発生を1つのターゲットとしてその機構解明を行うなど先見的工学の確立を目指している。</p> <p>後半の段階にきて、酸化物セラミックスの照射挙動の再現と解析に関し重要な成果が得られており、照射下の燃料・材料挙動の研究に新たな展開となることが期待される。最終年度では材料ふるまい解析コードに集約する方向で取組むとともに、結果をまとめるにあたり、工学的視点および機構的視点それぞれにおいて何が明らかにされたかクリアにするとともに、非専門家にも理解できる形での提示が望まれる。</p> <p>日本の軽水炉燃料の高燃焼度化は、欧米に10年程度遅れていると考えられ、低価格の電力供給という点で国民的損失が大きい。本研究には、ぜひとも日本が高燃焼度化の遅れを取り戻すのに貢献してほしい。かかる観点でのとりまとめも期待される。</p> <p>最終的には、本課題において提言的な本質的な貢献をめざし、世界的なコアとなるような方策を検討してほしい。</p>	
<p>評価責任者氏名： 岩田修一</p>	