

平成17年度クロスオーバー研究の年次評価結果について（案）

平成18年4月25日  
原子力委員会  
原子力試験研究検討会

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も考え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18年2月10日(金)10:00~12:10(第4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、困難な問題に対する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、海外の同様な研究と相補的に進めるとともに、より効率的・効果的に研究を推進することが望まれる。

さらに、今回のWGでは時間的な制約もあり、WG委員との深い議論までには至らなかったが、今後とも研究実施者側と評価者側との議論と、そこでの意見等を踏まえた研究の実施が、研究全般の高度化と活性化に繋がることも期待するところである。

### < 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、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。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、uncertaintyを内包する。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〕</p> <p>「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。この目的自体は妥当であり、見直しは必要ないと思われる。</p> <p>〔独創性、新規性〕</p> <p>興味深くかつ重要な成果が得られつつある。</p> <p>1. マウスへの483日間にわたる低線量率（バックグラウンド線量率の約10倍、<math>1.0 \times 2.0</math>倍及び<math>1.0 \times 2.0 \times 2.0</math>倍）長期照射（集積線量はそれぞれ約20、400及び8000mGy）が完了し、貴重なサンプルが採取できた。これを利用して、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であり、今後の解析結果に期待したい。</p> <p>2. 自然放射線の10倍程度という低い線量率であっても、脾臓細胞で染色体異常頻度の上昇が認められたことなどは、予想外の結果であるとともに、健康リスクを考える上で重要な知見である。しかし、一方では寿命に影響がなかった（Radiation Res., 160:376-379 (2003)）ことを考え合わせると、健康リスクの評価における各指標の意義を十分に議論されたい。</p> <p>3. 計算機を用いたモデリングにより、一本鎖切断と二本鎖切断が誘発される割合が放射線の線質（電離密度）によってどのように変化するかについてのシミュレーションの結果が得られている。今後、実験的に得られる結果との比較により、モデルの妥当性の検証を望みたい。また近年、単純な切断ではなく、狭い範囲に集中して生じる「クラスター損傷」が生物学的に重要であるとされ、関心を集めている。クラスター損傷が、電離密度の低い放射線の場合に、どの程度生じるかの評価は、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可能性があるため、早急に進められたい。</p>

	<p>4. ヒト培養細胞での適応応答に関して、低線量事前照射によってその頻度が低減される突然変異を詳細に検討し、「小さな変異」が特異的に減少していることを突き止めたことは特筆すべき成果である。一方で、化学変異原と放射線との併用効果を解析した研究からは、両作用原の併用によって「大きな欠失」変異誘発頻度が減少することが示されており、検索指標の相違によるこの違いは、今後追及すべき課題の1つである。</p>
<p>(2)【効率性】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>研究手法（進め方の見直しの必要性）</li> <li>年次展開</li> <li>連携体制</li> <li>予算配分</li> <li>その他研究交流（国際的展開等）</li> </ul>	<p>[ 研究手法 ]</p> <p>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、両者の融合を常に意識し、研究を進められたい。</p> <p>[ 年次展開 ]</p> <p>1. 480日あまりにわたる長期照射が終了し、得られた試料の今後の本格的な解析が期待される。長期照射実験を再度繰り返す必要があるかどうか、あるいは異なる材料の長期照射が必要かどうかを早い時期に見極め、残された研究期間内に成果を上げられるよう、計画を常に吟味・検証し、最適な展開を心がけられたい。</p> <p>2. マイクロビームの装置の改良は進んでいるようであるが、結果が見えてこない。早急な計画の実行を望みたい。</p> <p>[ 連携体制 ]</p> <p>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評価できる。</p> <p>2. DNA損傷のモデル化（[必要性・新規性]項目3参照）や、適応応答に関する研究（上記[必要性・新規性]項目4参照）は、分担研究者間の連携により効率的な研究の推進が期待される。より一層の連携強化を望む。</p> <p>[ 予算配分 ]</p> <p>1. 低線量放射線による遺伝子発現の変化を調べる目的で、最先端技術と言えるmRNAマイクロアレイを用いた解析が進みつつある。極低線量率で照射した場合にも、照射によって転写が促進される遺伝子群が検出されているが、それらの数と放射線量との間に相関が未だ見られないことや、試料調製時のマウスのエイジとの関係等、得られつつある結果から、科学的に明確な結論を導くためには、今後更に検討しなければならない事項は多い。コストのかかる技術であるだけに、どこまで追求するかについて慎重に見極めつつ研究を進められたい。</p> <p>2. この事例を含めて、研究開始3年度目に当たる2006年度には、今後重点的に進めべき課題の選別とそれに見合った予算の配分の再検討が必要かもしれない。</p> <p>[ その他 ]</p> <p>国外の関連分野研究者との連携は良好のようである。泊りこみでワークショップを開催するなど、グループ内研究者間および国内外の斯界の研究者の相互交流を、意欲的に進めているものと評価できる。</p>
<p>(3)【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>目標達成時における科学的意義</li> <li>目標達成時における他分野、一般社会への波及効果</li> </ul>	<p>[ 科学的意義 ]</p> <p>生物が放射線に対して「受身」ではなく、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。このことは、放射線という枠を越えて、広く生体のストレス応答の解明につながるものであり、生命活動の本質に迫る課題であるといえる。</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、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低減・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。</p>

<p>(4)【クロスオーバー性】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究の効率化、成果の相乗効果</li> <li>・ プロジェクトリーダーのリーダーシップ</li> </ul>	<p>[ 研究の効率化、成果の相乗効果 ]</p> <p>適応応答に関する一見相反する結果につき、相互チェックを行うことができれば、理解が進むものと期待される。またコンピュータモデルの検証は実験的研究を進めているグループの協力を得て、速やかに実施されたい。プロジェクト・メンバー間の相互連携の余地がまだまだ残っていると思われる。</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2年を経過して、プロジェクトリーダーが研究分担者の仕事を把握し、的確な方向付けを行っているとは評価できる。リーダーから、一部研究組織の見直しの提案があったが、妥当なものとは判断する。この点も、リーダーがこの研究分野の動向を把握していることの反映と思われる。</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>個々の研究については非常に興味深い結果が得られつつあるが、個々の成果を最終目的である「ヒトの健康リスクの評価」に向けてどのように融合させ統合していくかを常に念頭に置き、議論を交わしつつ研究を進められたい。</p>	
<p>4 . その他</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 当初より予想されていたことではあるが、「バックグラウンド」の存在する状況で、低レベル放射線による「わずかな増分」を適切に評価することの困難さが改めて浮き彫りになっているように思われる。データ特に統計的に条件の悪いデータの処理等については、外部の有識者の支援を仰ぐなど、十分に配慮されたい。</li> <li>・ 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と考ええる。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。</li> </ul>	
<p>5 . 総合評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 長期照射したマウス試料を用いて興味深い成果が得られつつあり、全体としては、着実に計画が進んでいるものと評価できる。</li> <li>・ 個々の研究項目については、先行きが見えにくいものもあり、今後重点を置くべき課題の選別とそれに見合った予算配分の調整が必要であろう。</li> <li>・ 分担研究者間の連携をさらに強化し、効率的な研究の推進を望む。</li> <li>・ 得られつつある成果を最終目標である「ヒトの健康リスク評価」にどのようにつなげていくかにつき、今後十分に作戦を練る必要がある。</li> </ul>	
<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、（財）電力中央研究所、東京大学、北海道大学、九州大学、独立行政法人物質・材料研究機構他	
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 (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〕 今後予想される原子燃料の高燃焼度化では、燃料ペレット（<math>UO_2</math>）の回復力による微細組織変化、とくに体積変化をもたらす結晶粒の細粒化と、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。 本研究の目標は、原子燃料セラミックスの自己修復力の機能を表すモデル（数学的定式化）を見出し検証し、照射下の組織変化を制御する技術開発として細粒化・リム組織形成の計算コードを開発して、高エネルギー線量照射下における非線形・複雑系に関する先見的工学の前進に寄与することであり、そのねらいは妥当である。</p> <p>〔独創性、新規性〕 加速器照射実験による細粒化の再現、第一原理計算による<math>UO_2</math>の点欠陥パラメータの評価や希ガス気泡モデルの構築など興味深い成果が得られている。高エネルギー核分裂片の材料通過中の電子励起と核散乱、燃焼に伴う希ガスの効果を取り入れて、高線量領域のセラミックス燃料の組織変化と細粒化を数学的にモデル化する試みは独創的である。</p>
(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	<p>〔研究手法〕 本研究は6つのサブグループに分けて実施している。とりまとめに1グループ、理論と計算解析に3グループ、実験に2グループである。理論解析は第一原理・分子動力学計算、非線形数学的研究、並びに計算コード開発とからなる。実験は加速器による<math>CeO_2</math>シミュレーション照射と<math>UO_2</math>を用いた試験からなる。 今後、実験と理論解析の対応については、研究の進捗に合わせてより緊密に繋げることを心掛けてほしい。実燃料の工学的因子を常に念頭においてほしい。実験解析を進めるうえで放射光など新しい手法も検討してほしい。</p> <p>〔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いる。ロードマップに示されているように研究の進捗状況に合わせてそれぞれ別のチェック＆レビューを行うことが有効と考えられる。 新しい課題への取り組みが実りつつあり、中間の年次にあたり成果の顕在化が今後期待される。</p> <p>〔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、物質・材料研究機構等で連携して進め、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とりまとめを進めている。今後、グループ内の横の連携と国内の燃料専門家や国際的連携をより積極的に行うよう留意してほしい。</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>・予算配分</li> <li>・その他研究交流（国際的展開等）</li> </ul>	<p>[ 予算配分 ] 概ね適当と考えられる。今後の実験研究の進展具合では不足も考えられる。</p> <p>[ その他 ] 平成 16 年度の第 1 回国際ワークショップ - 原子燃料の照射による乱れと自己修復 - が開催に引き続き、平成 17 年度には水炉燃料挙動国際会議（京都 10 月）のサテライトとして第 2 回国際ワークショップ - 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 - が開催された。 国外の研究機関との連携として、米、仏、独からの研究者招聘などは、積極的な交流が図られているといえる。</p>
<p>(3)【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標達成時における科学的意義</li> <li>・目標達成時における他分野、一般社会への波及効果</li> </ul>	<p>[ 科学的意義 ] 照射・高線量のもとで、秩序ある組織がつくりだされる自己組織化プロセスが明らかになれば、照射の理解が大きく進むと考えられる。 複雑系の現象と計算科学的アプローチの融合がもたらす意義も大きいと考えられる。</p> <p>[ 波及効果 ] 本研究の結果、将来の高燃焼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貢献し経済的効果が期待される。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。また、自己組織化の理解・認識が一般社会に現実のものとして広まれば、核燃料に対する安全・安心の観点からも意義がある。</p>
<p>(4)【クロスオーバー性】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・研究の効率化、成果の相乗効果</li> <li>・プロジェクトリーダーのリーダーシップ</li> </ul>	<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と電力中央研究所が連携して <math>UO_2</math> と <math>CeO_2</math> の第一原理計算を実施している。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ている。加速器照射実験では、核分裂片のエネルギーを持つイオン種を照射できるのは国内でも原子力機構のタンデム照射施設に限られ、こ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っており、効率的に連携している。 今後とも、ロードマップに基づいて、個々の課題の目標とプロジェクト全体の目標を明確にして進めてほしい。</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。ロードマップの目標により進捗状況を具体的に把握し今後の戦略的展開が期待される。</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

実際の現象の再現であるかの検証に常に留意する必要がある。  
テーマの具体化とともに、学会などでより広い分野の専門家を加えた集中的な検討が有効と考えられる。

### 4．その他

本来、広範な実験を必要とするので、この研究者だけでやろうとせずにこの研究をてこにして実験グループの連携など強固なネットワークに繋げてほしい。  
過去の燃料照射研究の蓄積を活かすとともに、最近の原子炉構造材料の照射研究や核融合炉材料の照射研究における成果も活かすことが有効と考えられる。  
仮説段階であっても実燃料、実データと対応づけをして進めてほしい。  
課題が大きいので収束目標をより明確にしてゆくことが必要。

## 5．総合評価

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。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と高燃焼度に貢献する予測・制御コードの開発など先見的工学の確立を目指している。困難な課題に新しい概念の構築、理論的解析、加速器照射実験等を組み合わせた企画である。

事前および1年次評価コメントを参考にして研究のねらいがより絞られてきて、興味深い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。今後、成果発表を積極的に行うとともに、原子力学会等で成果の意義や実燃料技術への貢献を含めて議論してゆくことが有効と考えられる。

評価責任者氏名： 岩田修一