

平成 1 8 年度クロスオーバー研究の年次評価結果について（案）

1 . 評価実施の経緯

平成 1 6 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「P L」）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 W G 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 P L 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果的・効率的に推進し、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19年2月9日(金) 13:00～15:00 (第5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、科学的な事実の確認と解釈をしつつあり、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しつつある。

さらに、今回のWGでは時間的な制約もあり、WG委員との深い議論を開始し、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、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。この目的自体は妥当であり、見直しは必要ないと思われる。ただし、ゴールを視野に入れつつ課題の整理・絞込みは検討すべきである。</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(バックグラウンド線量率の約10倍、10×20倍及び10×20×20倍)で483日(一部485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8000 mGy)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により、DNA二本鎖切断とDNA修復関連タンパクの相互作用についてのシミュレーションの結果が得られている。近年注目を集めている「クラスター損傷」(狭い範囲に集中して生じる損傷)と修復関連タンパク質との相互作用を通じてクラスター損傷の修復可能性についての情報が得られれば、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。クラスター損傷の生成の線量効果関係のシミュレーションと合わせ、早急に進められたい。</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、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>・連携体制</p> <p>・予算配分</p> <p>・その他研究交流（国際的展開等）</p>	<p>[ 年次展開 ]</p> <p>1 . 480日あまりにわたる第 1 回長期照射が終了し、試料の解析結果が得られつつある。ここで採用した照射条件は、照射日数を固定しているため、低線量率照射の場合には総線量も低く、線量率が高い場合には総線量も高い。本来の意味での「線量率効果」を検討するには、同じ総線量を線量率を変えて照射する必要がある。ここまでに得られている成果を吟味し、残された研究期間内にどのような照射を行う必要があるかを十分に検討されたい。</p> <p>2 . マイクロビーム照射装置を用いた研究から、照射された細胞のアポトーシスとバースタンダー効果の結果として起こるアポトーシスの違いが見られるなど、新たな知見が見出されつつある。</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高く評価できる。</p> <p>2 . 遺伝子発現の促進に見られるように（項目(4) [研究の効率化・成果の相乗効果]参照）、課題を分担するだけでなく、お互いに検証するような連携が行えれば、データの信頼性が更に増すものと考えられる。</p> <p>[ 予算配分 ]</p> <p>1 . 研究を進めるにあたり、マンパワーのための予算の不足を憂える声が聞かれた。限られた研究資源の中では、当初計画で取り上げた研究課題を単に継続するだけでなく、課題に優先順位をつけて絞込みを行う工夫も必要であろう。mRNAマイクロアレイを用いた解析から自然放射線の10倍程度の線量率で照射したマウスの腎臓において発現が増強される遺伝子が見出された。コストのかかるマイクロアレイを用いて、発現が変動する遺伝子をさらに探索するのか、あるいは既に見出されている遺伝子の性状解析を深化させるのか、方針を固める必要がある。</p> <p>2 . この事例を含めて、研究開始 4 年度目に当たる2007年度には、ゴールを見据えつつ重点的に進める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となろう。</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。国内学会（放射線影響学会）時に国外の関連分野研究者を招いて開催したワークショップは、本プロジェクトに参画する研究者間の相互交流だけでなく、プロジェクトの進捗状況を関連分野の研究者等にアピールする上でも大いに有効であった。</p>
<p>(3) 【有効性】</p> <p>・目標達成時における科学的意義</p> <p>・目標達成時における他分野、一般社会への波及効果</p>	<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"> <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>極低線量率での遺伝子発現の促進が、腎臓では見られるものの、肝臓では見られない等、理解しにくい結果もある。遺伝子発現増強に臓器特異性があるとすると非常に興味深い知見であるが、相互チェックによって更に確認する必要があるだろう。</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3年を経過して、プロジェクトリーダーが分担課題の内容を把握した上で取りまとめを行っているものと認められる。</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> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 種々の指標につきデータが蓄積しつつあるので、オーソドックスな線量効果関係に加え、「線量当りのリスク」を線量ごとに算定するなど、低線量のリスク推定へ向けて様々な角度からの解析を開始したらどうか。</li> <li>・ 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。健康リスクの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。</li> </ul>	
<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。やや高い線量を用いてデータの確度を上げるのか、あくまでも低い線量での解析を進めるのか、対象としている指標ごとに検討を加え、有用な情報の蓄積を目指されたい。</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。</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る。アウトプットとしての発表論文数も36編を数え、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>・ 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>・ これまでに得られた成果を、最終目標である「ヒトの健康リスク評価」へ向けどのように収束させていくかを念頭において研究を進める必要がある。</li> </ul>	
<p>評価責任者氏名：嶋 昭紘</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	[ 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(UO <sub>2</sub> )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)を見出して検証し、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することであり、そのねらいは妥当である。ただし、適用範囲については十分検討して進める必要がある。  [ 独創性、新規性 ] 燃料の照射下の構造変化を実験および計算シミュレーションにより明らかにするという新しいアプローチである。加速器照射実験による面状欠陥・組織の再現、分子動力学とモンテカルロ法による異なる時間スケールでの計算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。
(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	[ 研究手法 ] 実験的シミュレーションについては、加速器による面状欠陥の再現と電子顕微鏡による組織観察、放射光やレーザーマンによる状態解明を試みている。計算シミュレーションにおいては、希ガス原子と格子欠陥の複合体を模擬するため分子動力学法とモンテカルロ法を組合わせて取り組んでいる。これらの知見をもとに照射下の材料ふるまい解析コードの開発を目指しており、進め方は概ね妥当である。 今後、工学的意義、現象論、基礎的メカニズムそれぞれの点でどの部分をどこまで明らかにしたかを分かりやすくする工夫がほしい。基礎的メカニズムについては、面白い成果が得られているので効果的な集約を期待する。  [ 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着実な成果が得られてきている。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。 本来、時間と手間のかかる仕事が多いため、全体像をより明らかにしていく努力が必要であろう。  [ 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

<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>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。今後も、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。国際的にはフランスとの協力および差別化が重要と考えられる。</p> <p>[ 予算配分 ] 概ね適当と考えられる。特に予算が制約になっている課題は認められないが、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、平成17年度の第2回国際ワークショップに引き続き、第3回国際ワークショップをフランス、インド、ユーラトムからの参加を得て開催した。 国外の研究機関との連携として、米国やインドからの研究者招聘など、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、多原子固体のセラミックスについて秩序ある組織が作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。 実験によ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 ] 本研究では、加速器と放射光のナノ技術による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。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、電力中央研究所、北大が連携してUO<sub>2</sub>とCeO<sub>2</sub>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。さらにKEKと原子力機構の放射光実験にも取り組んでいる。 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>
<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"> <li>・ 全体のネックの部分をはっきりと明らかにして研究を進めることが有効と考えられる。</li> <li>・ 高燃焼度化による影響が、それを妨げる領域（程度）までいたらないようにするにはどうすればよいかを示すように、報告がまとめられてほしい。</li> </ul>	
<p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本来、広範な実験と解析を必要とするので、この研究者だけでやろうとせずこの研究をてこにして実験や解析グループの連携など、世界の研究開発のコアとなるような方策を検討してほしい。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も有効と考えられる。</li> </ul>	

- ・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。
- ・成果の発表をさらに進めてほしい。

#### 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。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。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、2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。最終年度に向けた2年間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分かりやすく示していく努力をしてほしい。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さらに議論してゆくことが有効と考えられる

最終的には、本課題において世界的なコアとなるような方策を検討して行ってほしい。

評価責任者氏名： 岩田修一