

平成21年9月29日

クロスオーバー研究に係る事後評価結果について

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してきた。今年度は、クロスオーバー研究の実施期間終了を受け、このことも踏まえてプロジェクトの事後評価WGを6月に開催して、事後評価を行った。

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の指名によって実施され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、創造的知見によって既往の知見を、実験データの不足している未踏領域へ外挿するとともに、その体系化を図る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、今後の研究活動の活性化に貢献するかを主な着目点とするべきである。

一方、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ことを求めてきたところ、評価にあたっては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重要である。

クロスオーバー研究の評価に当たっては、以上の点に留意しつつ、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してきた。事後評価については、このような評価手法の効果についても留意すべきである。

具体的な評価作業については、原子力試験研究検討会に設置されている研究評価WGにおいて、PLが作成した共通調査票（研究期間、研究予算、研究目標、得られた成果、成果の発表実績及び自己評価等を記載）及び研究担当者からのヒアリングにより実施された。

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21年6月22日（月）10：30～15：00（第7回WG）

4. 評価結果総評

クロスオーバー研究は平成元年から4期にわたって続いた研究で、研究機関単独では速やかに成果を得ることが困難であり、各研究機関のポテンシャルの結集が必要な研究として実施された。第1期は5研究テーマ、第2期は10研究テーマ、第3期は8研究テーマが実施され、平成16年からの第4期の研究は、研究機関間のクロスオーバーだけでなく既往の細分化された学問領域・研究領域を超えることが要請される挑戦的な課題が検討され、公募型ではなく検討会でテーマを企画し、プロジェクトリーダーを指名して実施された。企画された「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」、「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」の2テーマには、(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の解明、(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ミッションを与えられた。

最終評価での両プロジェクトリーダーおよび分担者からのヒアリングでは、5年間の挑戦的な研究活動を通して、それぞれの研究グループが当該分野の国際的な研究拠点として認知されてきたことが報告された。このことは、プロジェクト参加者だけでなく、関連分野の多数の研究者を指揮してきたプロジェクトリーダーの努力が実ってきた結果として評価できる。前者は論文発表206件に加えて特許2件、受賞13件があり、後者も論文発表は163件に及び、全体として大きな成果を収めたと言える。

研究成果の詳細については原著論文や報告書を参照されたいが、「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」の研究に関しては、低線量放射線の生体影響が分子レベルでどのようなものであるかを理解し、非常に弱い外からのストレスに対する生体反応として放射線の生体影響がかなり複雑であることが分かり、同時にヒトへの低線量放射線リスク評価へ向けて単なる外挿を超えた新しい知的基盤を作ること成功したと評価する。高いレベルの放射線が人体に有害であることについては、20世紀を通して様々な研究・調査がなされ、その概要が解明されてきたが、低いレベルの放射線の人体影響については科学的なアプローチが緒についたばかりであり、21世紀の大きな課題となっている。この研究ではヒトに近いモデル動物としてマウスを用い、低線量および低線量率放射線の影響を最新の技術を用い分子レベルから多面的な解明

を試み、リスク評価のための基礎的なデータや知見が得られ、既往のデータの系統的な活用への道を拓いた。この5年間の分野の異なるいくつかの研究機関の研究ポテンシャルの集結の結果、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」へ向け本格的に展開するための知的基盤が形成できたと言える。

一方、「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」の研究では、高線量領域での核燃料の複雑なふるまいの解明に挑戦し、加速器による模擬材料を用いた細粒化現象の再現、同様に加速器による実燃料材料を用いたその前駆現象（すなわちセル構造の形成）の再現、損傷回復と細粒化のメカニズム解明、細粒化予測手法の開発等に関して所期の目標をほぼ達成し、高線量領域における燃料セラミックスの複雑な挙動に関する科学的理解への突破口を開いた。また、エンジニアリングとしては、計算科学手法と加速器利用シミュレーション手法の活用によって、メカニズム研究の迅速化、ひいては材料開発のターンアラウンド時間の短縮が期待できるようになった。このことは、燃料の加速照射試験の有効性を実証し、数年から数十年を要していた燃料照射試験に大きなブレークスルーをもたらす成果と評価できる。

最後に、両プロジェクトリーダーには、5年間で得られた成果を当該分野での学術論文として報告するだけでなく、この重要課題の成果を有識者や一般市民にとって理解しやすい言葉で社会に発信することを期待する。いま、原子力関係者の社会とのクロスオーバーが求められているからである。

<添付資料>

後 21 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」

後 22 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」

事後評価 総合所見シート

研究テーマ名（プロジェクトリーダー名）： 低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析 (東北大学大学院医学系研究科 教授 小野 哲也)	
研究参画機関名：独立行政法人放射線医学総合研究所、近畿大学、東北大学、独立行政法人理化学研究所、国立医薬品食品衛生研究所、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立感染症研究所、財団法人環境科学技術研究所	
項 目	要 約
1. 研究テーマの概要	<p>高いレベルの放射線が人体に有害であることについては20世紀を通して様々な研究、調査がなされその概要が解明されてきたが、低いレベルの放射線の人体影響については科学的なアプローチが緒についたばかりであり21世紀の大きな課題となっている。本研究ではヒトに近いモデル動物としてマウスを用い、低線量および低線量率放射線の影響を、分野の異なる研究機関の研究ポテンシャルを結集し、かつ最新の技術を用い分子レベルから多面的に解明しようとするものである。同時に本研究ではリスクの総合的理解の基礎作りのために適応応答、バイスタンダー効果、低線量放射線と化学物質の複合効果を分子レベルで解析し、またDNA損傷とその修復過程のコンピュータシミュレーション開発を並行して行う。これらの研究を通し、低線量放射線の生体影響が分子レベルでどのようなものであるかを理解し、同時にヒトへの低線量放射線リスク評価へ向けた新しい基盤を作る。</p>
2. 研究成果 ・当初予定の成果 ・特筆すべき成果 ・副次的な成果 ・論文、特許等	<p><u>当初予定の成果</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 総線量 20mGy、414mGy、及び 8000mGy での低線量率長期照射マウスでの染色体異常及び遺伝子突然変異について線量及び線量率依存性を明らかにした。 2) 低線量率長期照射したマウスの反応は染色体や DNA の変化より遺伝子発現の変化 (mRNA、蛋白質) の方がより高感度にみいだされることが明らかにした。 3) 化学物質と放射線と同時に暴露されると、それぞれ単独での暴露より異なる影響を受け、その原因として、DNA 修復や細胞周期制御、p53 レベルの変化などが重要であることを明らかにした。 4) 適応応答が発動すると放射線誘発突然変異では小さな変異の誘発が抑制されることが示された。 5) マイクロビームを用いてバイスタンダー効果を解析する系を確立した。直接被ばくした細胞とバイスタンダー効果を受けた細胞では、アポトーシスや遺伝子発現の変化が異なることを明らかにした。 6) DNA 損傷と修復のコンピュータシミュレーションにより損傷 DNA の生成、DNA 構造の変化、修復酵素との相互作用などがかなり精度良く再現できることがわかった。 <p><u>特筆すべき成果</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 長期低線量・低線量率照射したマウスを用いることで、超低線量・低線量率域での染色体異常、突然変異誘発、遺伝子発現に関する世界最初の情報を得ることに成功した。 2) 低線量率長期照射や適応応答、バイスタンダー効果で見出された遺伝子発現の変化は、低線量放射線によって細胞が生理的な反応をしていることを示唆するもので、これまでは考えられていない現象であり、さらに詳細な解析を進めることで放射線の生体影響について新たな展開を期待できるものと考えられる。 3) 化学物質と放射線による複合効果の解析は、細胞の応答性が非常に複雑であることを示しており、今後のリスク評価に向けて新しい研究領域の必要性を示したものと考えられる。 4) シミュレーションは生体分子の反応を非常に詳細にしかも実験的な検証の不可能な領域にまで深めることも可能とするもので将来の有力な解析方法になるとと思われる。 <p><u>副次的な成果</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 放射線による突然変異生成には非相同末端結合修復に関わる Ku70 が大きく関与していることが分かった。 2) ATM は小腸幹細胞の D1b1 遺伝子では放射線による変異誘発に対し抑制的に働いていることを見出した。 3) 化学物質と放射線の複合効果に対しミスマッチ修復機構が関与していることを見出した。 4) 重粒子線で照射された細胞が分裂した後、形態的分化誘導が加速されることを明らかにした。

	<p>5) 放射線照射によって p 21 が活性化される時、転写因子 Oct-1 も活性化され p 53 と協同的に働いて p 21 を制御していることを明らかにした。</p> <p>6) マウス皮膚では外からのストレスがない状況で週令特異的に DNA 二重鎖切断のマーカーとされる γH2AX が発現していることを見出した。</p> <p>7) DNA 二重鎖切断を修復する酵素のひとつである Ku80 は照射後 5 秒後にはすでに損傷部位に集合していることを明らかにした。</p> <p><u>論文、特許等</u> 論文発表 206件、特許取得1件（特許第3799445号）、特許出願中1件（特願2006-542244） 受賞 13件、口頭発表 312件 インターネットでの公表 (http://www.nox.jp)</p>
<p>3. 事後評価</p> <p>(1) 【必要性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目的・目標の必要性、妥当性 ・独創性、新規性 	<p><u>目的・目標の必要性、妥当性</u> 原子力・放射線利用の激増が予想される21世紀社会では、低線量放射線の人体影響の解明は、日本のみならず国際的な緊急の課題である。従って、本研究の「低線量放射線の生体影響を分子レベルで解明し、ヒトへのリスク評価に向けた新しい基盤となる生物情報の提供」という目標は妥当であり必要な研究である。</p> <p><u>独創性、新規性</u> 1) 我が国の施設のみで可能な長期低線量・低線量率照射したマウスを用いることで、この線量・線量率域での染色体異常、突然変異誘発、遺伝子発現に関する情報を得ることに成功した。この成果は、世界最初の知見と言え、今まで未知の領域であった超低線量・低線量率による放射線被ばくの生体影響を解明する基盤となる成果であり、独創性、新規性は非常に高いといえる。</p> <p>2) 計算機を用いたモデリング手法を実際の生化学的な研究成果により検証し、DNA損傷や修復におけるシミュレーションによるモデル系を確立した。今後、実験できない領域や、クラスター損傷等の生体反応に応用できる可能性があり、独創的な研究である。</p>
<p>(2) 【効率性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究手法 ・年次展開 ・連携体制 ・研究予算 ・研究交流（連携機関意外との研究交流、国際的展開等） 	<p><u>研究手法</u> 生体応答をマウス（個体）と細胞を用いて解析し、シミュレーションによるモデル化を試みた研究手法は相互の相乗効果も期待され研究戦略として優れている。特に、長期低線量・低線量率照射したマウスを用いた解析は高く評価できる。また、ヒトの培養細胞を用いたことは、研究成果をヒトのリスク評価に外挿する場合に有効である。</p> <p><u>年次展開</u> 最終目標である「ヒトの低線量放射線リスク評価へ向けた新しい基盤」に向けて、経年的に成果が蓄積されてきた。個体レベルでは、長期低線量・低線量率照射した影響解析が進み、大きな成果が得られた。また、細胞レベルでは、適応応答やバイスタンダー効果、化学物質と放射線の複合作用に関し、経年的に多くの知見を集積した。また、評価委員会の指摘やアドバイに従い、研究計画や手法の適切な変更、修正を行っており、実りある成果に繋がった。</p> <p><u>連携体制</u> 1) 環境科学技術研究所の低線量率放射線照射施設で照射したマウス試料を、分担研究者がそれぞれの専門的技を用いて解析した点は、連携研究として高く評価できる。</p> <p>2) シミュレーションと生化学の研究者が、一緒になり解析結果を検討することでモデル系を確立できたことは、連携研究の成果である。</p> <p>3) 動物実験、細胞応答実験、及びシミュレーションの研究者が、毎年何回か開催する会合で意見を交換することで、低線量放射線の生体影響に関する全体像を把握でき、研究を推進する上での相乗効果が認められる。</p> <p><u>研究予算</u> 総額予算の規模は、研究を遂行する上で適切である。予算の経年的な減額はいたしかたない点もあるが、最終年度の予算は初年度の半分以下となっており、よりバランスのとれた予算配分が望ましい。</p> <p><u>研究交流</u>： 研究者交流実績は、国内30件、国外16件あり、活発な交流が認められる。また、5回の国際シンポジウムが開催されており国際的な情報発信や研究交流も進んだ。この様な活動で培われた国際的な研究者ネットワークは、今後の研究展開にも有効と考えられる。</p>

<p>(3) 【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・科学的意義 ・他分野、一般社会への波及効果 	<p><u>科学的意義</u> 超低線量・低線量率照射における生体影響に関し染色体異常、突然変異誘発、及び遺伝子発現において基礎資料を得たことは、新しいリスク評価の基礎となるものでその意義は大きい。同時に、これらの知見は、生物が環境からうけるストレスに対する応答現象として捉えることもでき、放射線の枠を越えて生命の基本原理に迫る課題と言える。</p> <p><u>波及効果</u> 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、一般国民が抱いている微量放射線に対す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産業や医療での放射線の利用における理解を得る上や、安全性を確保する上でその波及効果は大きい。その為には、得られた成果や展望を規制関係者や国民に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><u>研究の効率化、成果の相乗効果</u> マウス個体レベル、細胞レベル、及びシミュレーションによるモデル化の研究が相乗的に作用し、研究の効果的な進展に大いに寄与したと認められる。同時に、これら三者から得られた情報が有効に組み合わせられることにより、「ヒトへのリスク評価に向けた新しい基盤となる生物情報の提供」という目的に向け基盤となる研究成果を得ることに成功している。</p> <p><u>プロジェクトリーダーのリーダーシップ</u> プロジェクトリーダーは、マウスや細胞を用いた突然変異や細胞応答の研究に精通しており、分担課題の内容や進捗状況を的確に理解・把握し、適切な方向付けを行ったと判断できる。また、リーダーは、この分野全体の研究動向を俯瞰することができ、研究を統合的に推進するリーダーシップを発揮できたと考えられる。</p>
<p>4. 研究テーマの今後の展開、高度化に向けての留意点・アドバイス等</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 長期低線量・低線量率照射したマウスの生体影響（染色体異常、突然変異誘発、遺伝子発現等）は、今後も解析を進め、より総合的なデータ基盤を構築する必要がある。 2) 同様に低線量・低線量率照射したマウスの生体影響解析に関しては、網羅的なゲノム解析やゲノム発現情報の解析が必要と考えられる。 3) 研究成果をヒトのリスク評価に外挿する観点から、マウス実験で得られた結果を臓器、さらには個体までインテグレートする方針で研究を展開して欲しい。 4) 研究開発が、ヒトのリスク評価へ繋がるための戦略を明らかにして研究を実施して欲しい。 5) DNA損傷と修復のコンピュータシミュレーションは、生化学や結晶構造解析の成果により検証することで適用範囲の拡大とさらなる普遍化を図る必要がある。 6) ヒトのリスク評価に向け、ヒトとマウスの低線量放射線に対する応答の異同について詳細な検討を進めて戴きたい。 7) 化学物質と低線量率放射線の複合効果についてはDNA修復機構や細胞応答機構を含む戦略的な研究を期待したい。 8) 現行のリスク評価体系を形成している考えかたと、その基礎データとなる疫学研究の動向について常に留意して研究を展開することを期待する。 	
<p>5. その他</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 本研究の成果が、LNT仮説の検証にどの様に役立ち、今後、本研究をどの様に展開すればそれがより実効性を持つか検討願いたい。 2) 本研究の成果は、最終的には専門家のみならず広く国民に知らしむべきものである。理解しやすい情報発信についても、具体的な準備を進められたい。 3) 超低線量率の実験に関しては、より精度の高い結果を得る方策を工夫されたい。 	
<p>6. 総合評価</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 超低線量・低線量率照射したマウス試料や照射したヒト培養細胞から低線量域放射線に特有な生体影響を認める有意義な結果が得られた。研究成果としては、論文発表206件、特許2件、及び受賞13件に及んでおり、全体としては大きな成果を収めたと言える。 2) 分担研究者間の連携が強化され、効率的な研究が展開されたと認められる。特にマウスとヒト細胞を用いた研究の展開と、相互の研究成果の比較・検討は、最終目標であるヒトのリスク評価の為には有効な手法であると評価できる。 3) これまで得られた成果を、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、どの様に展開するかは今後の課題である。 	
<p>評価責任者氏名： 岩田 修一</p>	

事後評価 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 (財団法人電力中央研究所柏江研究所原子力システム部 上席研究員 木下 幹康)	
研究参画機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構、財団法人電力中央研究所、東京大学、北海道大学、九州大学、大阪府立大学	
項 目	要 約
1. 研究テーマの概要	<p>発電用原子炉の燃料セラミックス材料（二酸化ウラン、UO_2）が高線量領域でどのように放射線を受け止め同時に健全性を維持しているか、そのメカニズムの詳細な解明を進めることが、軽水炉燃料の高燃焼度化を実現するうえで不可欠である。燃料ペレットへの設計要求は、体積の増減が小さく、燃焼に伴う生成物（特にキセノン等の希ガス）を内部に保持し続けることにあるが、組織の細粒化が生じると気泡発生による膨張や機械的な脆化などを伴い、さらなる高燃焼度化への支障となる。従って次世代の燃料材料では、細粒化のしきい燃焼度を高くしたり、組織変化を抑制するなどの改良が求められる。</p> <p>また学術的にこの組織変化は、核分裂エネルギーが熱化する非平衡準定常系で、結晶欠陥の生成、回復、組織創成が生じるプロセスであり、その体系化は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を可能にすると考えられる。</p> <p>本研究の具体的な目標は、1) 加速器による模擬材料と実燃料材料の細粒化現象再現、2) 損傷回復と細粒化のメカニズム解明、3) 細粒化予測手法の開発、を行い燃料の健全性の予測・制御に貢献することである。</p>
2. 研究成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当初予定の成果 <p>1) 加速器による模擬材料と実燃料材料の細粒化現象再現に関して、燃料セラミックス(UO_2)および同じ結晶構造の酸化物セラミックス(CeO_2)において亜結晶の形成に世界的に初めて成功するとともに、それらの照射欠陥の挙動を第一原理計算と放射光実験などにより総合的に明らかにした。</p> <p>2) 損傷回復と細粒化のメカニズム解明に関して、結晶欠陥の回復・秩序形成が核分裂トラックによる電子励起と局所過熱によることを電子顕微鏡観察と分子動力学計算で明らかにし、高密度の希ガスナノ気泡が回復を阻害することを見出した。</p> <p>3) 細粒化予測手法の開発に関して、大規模な分子動力学計算を用いて照射による欠陥クラスターを調べるコードシステムを開発した。</p> ・ 特筆すべき成果 <p>細粒化を再現する実験成功により、原子炉照射下での組織変化を原子炉外で加速器照射により模擬する技術開発の扉を開いた。理論的には、第一原理計算や分子動力学計算により酸化物セラミックスにおける原子スケールでの安定性を推定する手法に見通しをつけた。</p> ・ 副次的な成果 <p>実験シミュレーションを通じて、高エネルギーイオン照射による薄膜剥離現象を見出し、電子励起効果を材料工学的に利用する可能性を示した。</p> ・ 論文、特許等 <p>学術論文17編、国際会議報告73件、国内学会等報告63件。</p>
3. 事後評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 必要性 <p>(1) 【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必要である。</p> ・ 独創性、新規性 <p>燃料の高線量照射化の微視的構造変化を、加速器実験等と計算シミュレーションを組み合わせ、実燃料実験も参照して総合的に解明するという新しいアプローチである。</p>
(2) 【効率性】	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究手法 <p>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るなど、クロスオーバーの特色を活かして進めた。</p>

<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究交流（連携機関意外との研究交流、国際的展開等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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、実験と計算の両方の特色を組み合わせで進め、本来時間と手間のかかる課題に取り組み、特に後半に成果を得た。 ・ 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た。 ・ 予算配分 おおむね妥当と考えられる。 ・ その他 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た。燃料製造関連研究者との議論には原子力学会での場が活用された。
<p>(3) 【有効性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 科学的意義 ・ 他分野、一般社会への波及効果 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 科学的意義 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の体系的な解明に挑戦し、照射効果の理解に大きく貢献したと考えられる。 ・ 波及効果 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た。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。
<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 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究の効率化、成果の相乗効果 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進められた。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。 ・ プロジェクトリーダーのリーダーシップ 専門分野の経験と知見をもとに、具体的な企画を提案し理論と実験をまとめる努力をしている。なお、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したと考えられる。
<p>4. 研究テーマの今後の展開、高度化に向けての留意点・アドバイス等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高燃焼度燃料の挙動に関するエンジニアリングについての先見的な展望を提示してほしい。 ・ 加速器照射の知見を原子炉照射挙動の理解に定量的に役立てるために、原子はじき出し量や希ガス量などに加えて、核分裂トラックや電子励起効果を含めるような新しい物理指標が有効と考えられる。 ・ 劣化メカニズムの理解で明快な結論が示されたことで、今後の諸研究の発展的展開が期待される。高燃焼度技術という工学的な面での展開は今後に期待される。 	
<p>5. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 新たに得られた知見をもとに、従来の原子炉照射のデータを定量的に考察できれば工学的に有用と考えられる。 ・ 今後とも、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、わかりやすくまとめた成果公開を期待する。 	
<p>6. 総合評価</p> <p>高線量領域での未解決課題へチャレンジし、加速器による模擬材料と実燃料材料の細粒化現象再現、損傷回復と細粒化のメカニズム解明、細粒化予測手法の開発、に関して初期の目標をほぼ達成している。これらの知見は、高線量領域における燃料セラミックス挙動の本質的理解を可能にしたと考えられる。今後は、燃料の健全性の工学的な予測・制御に貢献するように展開することが望まれる。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の検討を続けてほしい。</p>	
<p>評価責任者氏名： 岩田 修一</p>	