

新クロスオーバー研究の事前評価結果について

平成16年4月6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年度から開始される新たな原子力基盤クロスオーバー研究（以下、「新クロスオーバー研究」という。）については、平成15年7月24日に開催された前回（第7回）の原子力試験研究検討会（以下、「検討会」という。）において、その基本的な推進方策が決定するとともに、実施すべき研究テーマの設定、並びに、研究テーマを統括するプロジェクトリーダー（以下、「PL」という。）の指名が行われた。また、あわせて、新クロスオーバー研究に係る研究評価を専管する本クロスオーバー研究評価WGが新たに設置された。

しかしながら、前回検討会の時点においては、具体的な評価要領及び評価委員の選任等については決定されるに至らず、検討会座長一任となっており、前回検討会以降、座長及び事務局が中心になり、さまざまな分野の有識者の意見等を踏まえつつ、当該評価の進め方等について鋭意検討を重ねてきたところである。

一方、平成16年度から研究が開始される前に、事前評価を行う必要があったことから、それまでの検討結果に基づき、評価要領の策定及び評価委員の選任等の手続きを本年1月中旬までに終わるとともに、去る2月に2回にわたって、研究評価WGを開催したので、クロスオーバー研究評価WGとして、その結果を報告するものである。

2. 評価の基本方針

新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重要であり、そこでの建設的な議論も重要な評価の成果である。

新クロスオーバー研究の評価に当たっては、以上について留意することとする。

3．事前評価実施テーマ及び実施時期

(1) 低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析

(第1回WG：平成16年2月5日(木)12:00～14:00)

(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

(第2回WG：平成16年2月10日(火)9:30～11:30)

4．事前評価結果総評

平成16年度から開始する新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、共に(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。その意味で、従前の計算機シミュレーションによる順問題の解析や既に結果が与えられて原因を究明する逆問題とは、難度の異なる極めてタフな課題である。

複雑で不確実性の多いこうした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。今回の事前評価の対象となった研究計画は、表面的にはプロジェクトリーダーを中心に平成15年度の初頭からの検討をまとめた計画ではあるが、内容的には各チームメンバーの試行錯誤を含む長年の研究開発の積み重ねを反映したものであり中身は濃い。評価WG議事録にも示されているが、初回からWG委員との本質的な議論も開始されている。プロジェクトリーダーを中心に、今後、より深く学問的な内容に踏み込んだ議論が展開されることが期待されるが、プロジェクトチームは結成されて間もない状況である。その意味でプロジェクトの開始される初年度においては、それぞれのプロジェクトチーム内での徹底的な議論に基づく問題設定の精緻化と役割分担の確認が必要であろう。

クロスオーバー研究の発足当時は、研究機関間の連携による成果の相乗効果に期待が寄せられ、硬直化しがちな組織の壁を破る効果もあった。しかしながら現在は公共機関でも民間でも組織の大規模な再編が推進されている時代であり、研究機関間の連携の実質的な意味は希薄になりつつある。その意味で、社会への貢献を一義

的に考え、先鋭化された個別学問分野を有機的に活用・展開・補完する本来の"クロスオーバー"へと方向を転換する時期が到来したと考えるべきであろう。新クロスオーバー研究には、そうしたブレークスルーも期待したい。

< 添付資料 >

- 参考 1 新クロスオーバー研究に係る研究評価実施要領
- 参考 2 クロスオーバー研究評価WG委員名簿
- 参考 3 新クロスオーバー研究における評価の手順
- 参考 4 - 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」
- 参考 4 - 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」
- 参考 5 - 1 研究計画書「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」
- 参考 5 - 2 研究計画書「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」

新クロスオーバー研究に係る研究評価実施要領

平成 1 6 年 3 月 9 日

原 子 力 委 員 会

原子力試験研究検討会

1 . 基本的な考え方

原子力基盤クロスオーバー研究（以下「クロスオーバー研究」という。）は、原子力の基盤技術開発の一環として、複数の研究機関の研究ポテンシャルを結集して実施する必要のある研究テーマについて、研究機関間の積極的な研究交流により研究開発を推進する制度として平成元年度に発足した。

以来、3期15年間にわたって、原子力基盤技術分野における重点技術領域の研究について、原子力委員会のトップダウンによる研究テーマ設定に基づき研究開発が実施され、すぐれた研究成果を挙げてきたが、近年の原子力技術を取り巻く状況の変化等を踏まえ、原子力試験研究検討会（以下、「検討会」という。）において、第3期研究以降のクロスオーバー研究の今後の在り方についての検討を重ね、平成15年7月に実施した第7回検討会において、その展開方策をとりまとめたところである。（「原子力基盤クロスオーバー研究の展開について」）

新たな原子力基盤クロスオーバー研究（以下、「新クロスオーバー研究」という。）においては、研究テーマの設定のみならず、その研究テーマを総理するプロジェクトリーダー（以下、「PL」という。）をあわせて指名し、PLの強力なリーダーシップの下、実験データの不足している未踏領域（高線量領域及び低線量領域）におけるデータの外挿と最新の予測手法によるその体系化という極めて挑戦的な研究を実施する。

したがって、その評価にあたっては、「国の研究開発評価に関する大綱的指針（平成13年11月 内閣総理大臣決定）」に則るとともに、国際的な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、限られた資金の重点的、効率的配分を図るとともに、研究活動に対する国費の投入について、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ける重要な観点となる。そのためには、評価者と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重要であり、そこで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。

なお、研究の推進の方向については、「原子力基盤クロスオーバー研究の展開について」（平成１５年７月 原子力試験研究検討会）に沿って行うが、常に評価結果が研究の推進に反映されるように努めるものとする。

２．評価の実施方法

（１）評価対象

文部科学省所管（項）原子力試験研究費により実施される新クロスオーバー研究の研究テーマ全般を対象とし、ＰＬが作成する研究計画案の目標設定、研究の方向性の妥当性等について評価を行う。また、研究計画を推進するための責任体制、研究分担体制、予算配分の妥当性のほか、特に研究連携による成果の相乗効果に重点をおいた評価を行う。

さらに成果の発信をはじめ、他の研究分野、一般社会への成果の波及に向けての方策やその後の研究の展開に向けて研究交流を進めるべき相手方の推薦等についても、あわせて助言・指導を行うものとする。

（２）評価の時期

上記の「１．基本的な考え方」に示したとおり、評価者と被評価者との継続的な議論の積み重ねが重要であるとの認識に基づき、事前・事後はもちろん、研究実施期間中においても、年１回程度、進捗状況の把握とその後の展開方策を議論するための中間評価を実施する。また、諸般の事情により、研究計画等を大幅に変更する必要が生じた場合には、ＰＬからの要請に基づき、適時の評価も実施できるものとする。

1) 事前評価

事前評価は、研究テーマの全実施期間を見通し、研究開発全体の方向性・目的・目標等の設定、着手すべきサブテーマの決定、研究手法の妥当性、予算を含めた研究の年次展開の妥当性、期待される成果・波及効果の予測、の判断等を行うために実施する。特に、当該研究が重点的研究であることに鑑み、実施される研究の内容が検討会の定めた推進すべき研究テーマに合致しており、それを具現化する内容となっているかについても評価する。

事前評価については、研究開始の前年度に実施する。

2) 中間評価

中間評価は、事前評価及び前年に実施された評価結果のフォローアップを行うとともに、研究開発の進捗状況の把握、研究開発の目的・目標の見直し、研究開発の進め方を見直し、予算及び実施機関の構成を含めた研究開発資源の配分方針の見直し等を行うため実施する。特に、中間評価においては、研究開発をめぐる諸情勢の変化（科学・技術の急速な進展や社会・経済に大きな情勢変化）等にも柔軟に対応して評価を実施するものとする。

中間評価については、原則として、次年度の予算要求に反映するとの観点から、研究実施期間中の各年度6月頃に実施するものとするが、研究期間の初年度及び最終年度については、それぞれ事前評価及び事後評価との関係を勘案し、評価の実施の有無を含めて、実施時期を別途検討するものとする。

3) 事後評価

事後評価は、事前評価及び中間評価における評価結果のフォローアップを行うとともに、研究開発の達成度、成功、不成功の原因の把握、新たな研究テーマの検討への反映、成果の発信及び得られた成果の普及方策等の検討を行うために実施する。

事後評価については、研究実施期間終了の翌年度に実施する。

4) 適時の評価

上記の評価とは別に、研究現場において諸般の事情により、研究計画を大幅に変更せざるを得ない状況等が発生した場合には、P Lの要請に基づき、

WG主査が必要と認めた場合には、研究開発の目的・目標の見直し、研究開発の進め方を見直し、あるいは、研究実施体制（構成機関等の変更等）の見直し等の方策についての検討を行うため、臨時の評価を実施できるものとする。

（３）評価体制及び評価者の選任

研究評価は、検討会のもとに設置されるクロスオーバー研究評価ワーキンググループ（以下「ワーキンググループ」という。）において実施する。ワーキンググループは10名程度で構成し、主査及び副主査を置くものとする。任期については、事後評価の時期を考慮し、研究テーマ終了の翌年度までとする。なお、検討会との連携を密に図るため、ワーキンググループの構成員（評価者）には検討会の委員を含むものとする。

評価者の選任にあたっては、評価対象となる研究テーマに関連する分野に精通する等十分な評価能力を有し、かつ、公正な立場で評価を実施できる外部専門家を選定することを原則とし、必要に応じて、評価対象となる研究テーマとは異なる分野の外部有識者を加えることとする。また、研究の進捗にあわせて、適時、評価者の交替、追加等を行うものとする。

但し、評価者が被評価者の実施する研究テーマにおける研究共同実施者である、あるいは、共同研究の相手方である等の利害関係を有する場合には、評価者は該当する研究テーマの評価には、加わらないこととする。

（４）評価の手続き

検討会は、評価における透明性、公正さ、信頼性、継続性を確保し、実効性のある評価を実施するため、本要領をあらかじめ被評価者に周知する。

ワーキンググループでは、PL（被評価者）が作成した研究計画書、被評価者からの意見聴取、毎事業年度毎の研究進捗状況報告書等をもとに、評価を実施する。

ワーキンググループは、研究評価ヒアリング実施後、研究テーマ毎に、評価結果をとりまとめ、検討会に報告する。

なお、評価に供する評価シート等については、評価の種類（事前、中間、事後等）に応じ、適宜、ワーキンググループにおいて別途定めるものとする。

3．評価結果の取扱い

(1) 評価結果の反映

評価結果は研究開発資源の重点的・効率的配分、研究開発計画の見直し等に適切に反映し、研究活動の一層の活性化を図る。そのための手続きとして、P Lは、評価結果を踏まえて修正を行った「研究計画」を検討会に報告し、研究の実施にあたり事前に検討会の了承を得るものとする。

(2) 評価結果の公開

検討会は、評価実施後、その後の研究における質の向上を図るため、被評価者に評価結果を開示する。また、研究開発の実態について国民の理解を得るとともに、評価の透明性、公正さを確保するため、機密の保持が必要な場合を除き、個人情報、知的財産権等に配慮しつつ、ワーキンググループが検討会に報告した評価結果（研究評価WG時における議論の概要等も含め）及び検討会における審議結果はインターネット等を利用して一般に公開する。同様にP Lが評価結果を踏まえ修正を行った研究計画についても検討会の了承が得られた後に公開するものとする。

4．その他

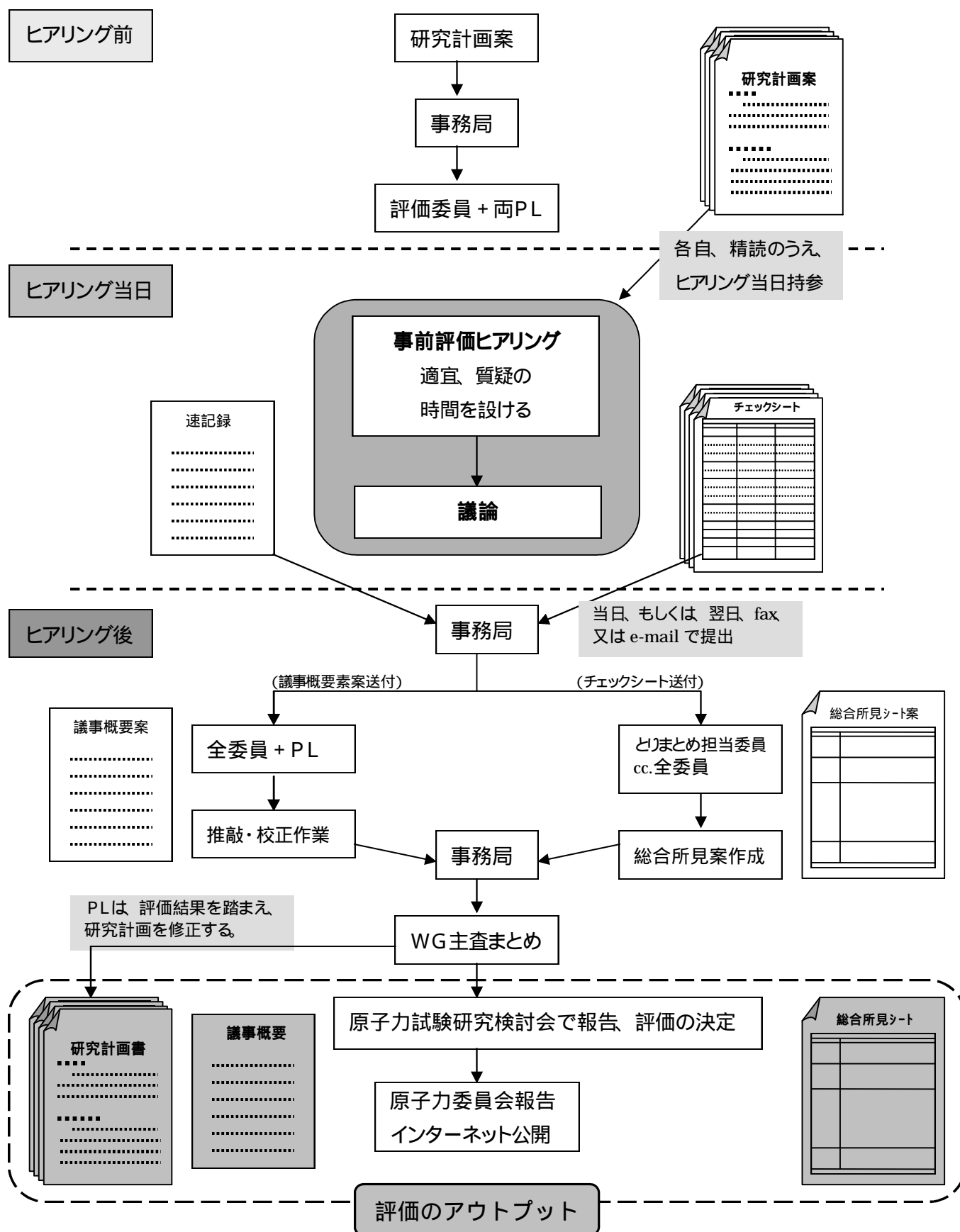
検討会及びクロスオーバー研究評価WGは、原子力基盤技術開発をめぐる諸情勢の変化に柔軟に対応して、常に研究開発の活性化が図られるよう、適宜、本要領の内容についてフォローアップを行うこととする。

クロスオーバー研究評価WG委員名簿

主 査	いわた 岩田	しゅういち 修一	東京大学大学院工学系研究科教授
副主査	あべ 阿部	かつのり 勝憲	東北大学大学院工学研究科教授
副主査	しま 嶋	あきひろ 昭紘	東京大学名誉教授
委 員	きたがわ 北川	げんしろう 源四郎	文部科学省統計数理研究所長
委 員	きたむら 北村	まさはる 正晴	東北大学未来科学技術共同研究センター副センター長
委 員	こんどう 近藤	たつお 達男	東北大学大学院工学研究科客員教授
委 員	さかい 酒井	かずお 一夫	(財) 電力中央研究所低線量放射線研究センター上席研究員
委 員	たなか 田中	はるくに 治邦	東京電力 (株) 原子力計画部企画担当
委 員	ともなが 朝長	まさお 万左男	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科原爆後障害医療研究施設長
委 員	にわ 丹羽	おおつら 太貫	京都大学放射線生物研究センター教授
委 員	みやけ 三宅	ちえ 千枝	元大阪大学教授

以上 11 名

新クロスオーバー研究における評価の手順



事前評価・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、日本原子力研究所、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．事前評価 (1)【必要性】 ・ 施策との整合性を含めた目的・目標設定の妥当性 ・ 独創性、新規性	<p>[目的・目標設定の妥当性]</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力、放射線の有効利用をはじめとする人類と放射線のかかわりの中で、低線量放射線のリスク評価は非常に重要であり、本プロジェクトの目標は適切かつ重要であると評価できる。 低線量域のリスク（例えば発がんリスク）を動物個体で直接に評価しようとする膨大な数の動物が必要となり、現実的でない。これに対して、動物個体レベルの実験に加え、細胞レベル、分子レベルの研究を組み合わせ、機構解明を通じてリスク評価にアプローチしようという方針は妥当なものである。 <p>[独創性・新規性]</p> <ul style="list-style-type: none"> 実験研究に加え、コンピュータシミュレーションの手法を取り入れたことは、放射線の生物影響の分野では新たな試みと言えよう。細胞・分子レベルであっても解析が困難な場合のある低線量影響の機構を、モデルを介して理解する可能性が開けるものと期待される。 これまで放射線の生物影響研究は、放射線のみを対象としてきた傾向があった。しかし、現実の生活の中での人間と放射線の関わりを考えると、放射線単独の場合はむしろ少なく、種々の化学物質との複合作用の場合が多い。この意味で、本研究において化学物質との複合影響も研究対象としている点は高く評価できる。
(2)【効率性】 ・ 研究手法 ・ 年次展開 ・ 連携体制	<p>[研究手法]</p> <p>本研究には8研究機関が参画し、マウス個体、培養細胞、分子・遺伝子の各レベルの実験的研究と、モデル解析を分担する。各レベルの研究成果を効果的に集約することができれば効率的な研究推進が見込まれる。</p> <p>[年次展開]</p> <p>長期照射を行う研究については、時期的に照射をオーバーラップさせる、短期照射実験と組み合わせる等、効率的な研究推進を工夫されたい。</p> <p>[連携体制]</p> <p>年に2回の情報交換をうたっている。本研究プロジェクトにおいては、各分担課題の研究成果をお互いの研究に反映させることが重要と考えられるので、この点について特に留意して頂きたい。</p>

<ul style="list-style-type: none"> ・予算配分 	<p>[予算配分]</p> <p>初年度107百万円、2年度以降もほぼ同水準の予算配分である。</p> <p>予算が各研究機関に、また各年度に機械的に割り振られているような印象を受ける。研究の進捗状況に応じた柔軟な運用を考えることも必要なのではないか。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・その他研究交流（国際的展開等） 	<p>[その他研究交流]</p> <p>研究計画には、ワークショップ開催、学会発表、国際誌への投稿などが記されているが、具体性に欠ける。研究参画機関以外との情報交換も重要であるので、世界的な研究動向を踏まえた上で研究情報ネットワークを構築してはどうか。</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> <ul style="list-style-type: none"> ・生物が低線量放射線という外部からの刺激に対してどのような応答を示すかの解明は、生物の外部からのストレス応答の解明につながり、ある意味で生命現象の本質に迫るものである。 ・低線量域放射線の影響を解析しさらにそれを予測することを通して、S/N比の低いデータからいかに情報を抽出するかに関するモデルケースとしても意義があろう。 <p>[波及効果]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来の「高線量からの外挿」ではない、科学的証拠に基づいた新たな放射線防護基準の設定につながる情報が得られる。 ・低線量域の放射線の生物作用についての科学的な情報の蓄積は、社会一般の原子力・放射線の利用に対する理解の促進につながるものと期待される。
<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 	<p>[相乗効果]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・動物個体、組織・細胞、分子、さらにはコンピュータモデルまで、多岐にわたる分野の専門家が共通の目標のもとに集うことは画期的なことである。相互の情報交換が有効に行えれば、非常に大きな相乗効果が期待できる。 <p>[リーダーシップ]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトリーダー自身が担当する課題は、動物個体レベルでの突然変異とmRNAの解析に関する研究であるが、個体レベルから分子レベルまで広い範囲の成果を取りまとめるに相応しい経験と実績を持っている。研究開始前の現時点では各課題の詳細について把握しきっていない面も見受けられるが、今後の情報交換を通じたリーダーシップに期待したい。
<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"> ・本プロジェクトの最終的な目標は「ヒトにおけるリスク評価」にある。マウスとヒトの共通性と、マウスの独自性を理解した上で、マウスで得られた結果をいかにしてヒトに適用するかについて議論を尽くして頂きたい。 ・さまざまな生物学的な指標についてマウスの「系統差」が知られている。本プロジェクトにおいては、複数の系統のマウスが用いられるが、研究成果の取りまとめにあたっては、それぞれの系統の特性について留意されたい。 ・ほとんどの分担課題で低LET放射線（ガンマ線、X線）を研究対象としているが、一部高LET放射線を対象とした研究もある。放射線の種類・線質によって生物作用が異なるので、将来的にはプロジェクト全体として放射線の種類の違いも検討するような展開も考えて頂きたい。 ・成果の一般公開にあたっては、「放射線」にまま見られる誤解の誘起を回避する配慮を望みたい。 	
<p>4．その他</p> <p>「低線量率・長期照射」が強調されているが、指標あるいは材料によっては短期あるいは高線量の照射による解析が適切なものもあると思われる。「低線量」「長期照射」という言葉にとらわれない推進を望みたい。ただし、高線量照射から得られた情報が、低線量の場合にどのように反映されるかの観点からの考察は不可欠である。</p>	
<p>5．総合評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低線量放射線の生物影響を動物個体、組織・細胞、分子の各レベルで評価し、コンピュータモデルによる解析と合わせて、放射線のリスク評価につなげようという意欲的なプロジェクトであると評価できる。 ・放射線防護指針の科学的な基盤の提供という側面と、外部ストレスに対する生体の応答の解明という応用・基礎の両面から重要かつ興味深い情報が得られるものと期待される。 ・プロジェクトの成否は分担課題間の情報交換と相互反映にかかっている。各分担課題担当者が「低線量放射線のリスク評価につながる情報の提供」という大きな目標を常に念頭に置きつつ分担課題を推進することが重要である。 	
<p>評価責任者氏名： 岩田 修一</p>	

事前評価・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：日本原子力研究所、（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、原子炉の照射環境で材料が変化するプロセス、特に非線形事象に対する予測技術の開発が重要であるとの観点に基づき、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・化学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．事前評価 (1) 【必要性】 ・ 施策との整合性を含めた目的・目標設定の妥当性 ・ 独創性、新規性	<p>[必要性] 軽水炉燃料の材料として二酸化ウラン(UO_2)が使われ始めてから約50年経過したが、その高性能（燃焼にともなう体積変化が極めて小さく、核分裂生成物を外に出しにくい）の理由は物理・化学的にいまだ説明されていない。集合体最高燃焼度で65～70MWd/kgMを超える将来の高燃焼度化で本研究によって組織変化のメカニズムが解明され、細粒化が材料学的視点から予測可能になれば、燃料材料改良による高性能化や高信頼性化が可能となると期待されるものであり、原子力試験研究検討会の定めた推進すべき研究テーマを具現化している内容となっている。</p> <p>[独創性] 原子燃料セラミックスの細粒化・カリフラワー構造形成の基本プロセスである“照射下の界面形成”のメカニズム解明を行うこと、照射下・高線量での類似の現象に対し実用性のある予測計算手法（計測を含むシステム）を開発し提案することにより、照射下の材料ふるまいの研究に新たな世界が開けることが期待される。</p>
(2) 【効率性】 ・ 研究手法 ・ 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する。実験に2グループ、理論と計算解析に3グループ、とりまとめに1グループである。実験は加速器によるシミュレーションと実燃料を用いた試験からなる。理論解析は第一原理計算並びに分子動力学計算、数学的研究、並びに計算コード開発とからなる。全体として整合性のある進め方をねらっていると考えられるが、研究の進捗にあわせて、より定量的な目標を明らかにされたい。</p> <p>[年次展開] 6つのサブグループで前半3年間と後半2年間で進める計画である。グループ1ではワークショップと取りまとめを、理論担当の3グループではそれぞれのタスクを前・後半に、実験担当の2グループでは加速器と原子炉を用いた計画からなる。 性格の異なる活動に同じタイムスケールをあてはめすぎているが、それぞれ別のチェック＆レビューが必要と考えられる。</p> <p>[連携体制] 幹事機関を日本原子力研究所とし、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・材料研究機構等で連携して進め、電力会社による協力、および事務局を設置しての国際ワークショップ開催で、国内外専門家の協力も得てとりまとめを進める計画となっている。 より連携を積極的に行うことにより強化される部分が多いと考えられる。</p>

<ul style="list-style-type: none"> ・予算配分 	<p>[予算配分]</p> <p>予算配分は初年度107百万円、2年度以降もほぼ同水準の見込み額である。初年度についてはエンジニアリング構築と理論研究に55.0百万円、加速器照射に37.6百万円、原子炉実験に4.5百万円となっている。</p> <p>原子炉実験の比重が小さ過ぎるように見える。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・その他研究交流（国際的展開等） 	<p>[その他研究交流]</p> <p>国外の研究提携機関は、UCLA(米国)、ブラッセル自由大学(ベルギー)、超ウラン元素研究所(EURATOM)、EdF/CEA(Saclay, Cadarache)(仏)、スタズヴィック研究所(スウェーデン)などであり、積極的な国際的展開が図られているといえる。</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>照射・高線量のもとで、秩序ある組織が作りだされる(創発)プロセスが明らかになれば、照射の理解がおおきく進むと考えられる。</p> <p>[波及効果]</p> <p>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が可能になり経済的な利益が得られると期待される。</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>理論的研究との組合せ、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。</p> <p>ただし同一分野の研究者との交流に留まっている印象があり、直接的には過去の燃料の照射研究の蓄積を活かす、間接的には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を活かす工夫が必要と考えられる。</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。</p> <p>ただし、テーマの具体化にあたり、より広い分野の専門家を加えて集中的な検討を行うことがより有効と考えられる。</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> <ul style="list-style-type: none"> ・部分的な仮説の根拠となったデータベースをしっかりと引用しつつ、核燃料全体を視野に捉えた生産的な議論が展開できるように準備すること。 ・広い領域の人材を適宜活用されたい。 ・現象の観測と数学的解析との対応・つながりを常に心がけて進めてほしい。 	
<p>4．その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料UO_2の工学的解決を目指すのであれば、燃料専門家をもっと含めて現実的、総合的に取組む方法も考えられる。 ・一方、高線量領域の材料挙動制御というタイトルであれば、燃料セラミックス、金属材料、セラミックス-金属相互作用を含めた非線型現象を対象として、より広く専門家を集め、研究全体を解析やソフト指向にまとめることも考えられる。初年度における徹底的な議論を通してプロジェクトの方向と個々のサブテーマの役割を明らかにすることが大切である。 	
<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。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、加速器と原子炉照射実験を組合わせた企画である。</p> <p>ただし、計画の骨格の目指すところは理解できるが、高線量領域における新しいエンジニアリングとするためには、評価WGでの多くの率直なコメントを活かして計画を練り直すことが有効と考えられる。主な点をあげると、実際の核燃料における要求性能との具体的な関わり、原子炉照射実験と加速器実験との役割、より積極的にクロスオーバー性を加える、などである。ヒアリングではこれらの疑問に対して、幹事機関をはじめサブリーダーの積極的な議論への参加とそれぞれのサブテーマの意味についての明確な回答が欲しかった。</p>	
<p>評価責任者氏名： 岩田 修一</p>	

新原子力基盤クロスオーバー研究 研究計画書【概要】

1. 研究テーマ名

低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析

2. プロジェクトリーダー（P L）の氏名・所属等

氏名：小野 哲也

東北大学 大学院医学系研究科 教授

3. 研究実施機関名（代表者氏名）

【幹事機関】独立行政法人 放射線医学総合研究所（早田 勇、根井 充、小池 学）

（連携機関）近畿大学（藤川 和男）

（連携機関）東北大学（小野 哲也）

（連携機関）財団法人 環境科学技術研究所（松本 恒弥）

（連携機関）独立行政法人 理化学研究所（谷田貝 文夫）

（連携機関）国立医薬品食品衛生研究所（能美 健彦）

（連携機関）日本原子力研究所（鳴海 一成、齋藤 公明）

（連携機関）国立感染症研究所（前川 秀彰）

4. 研究計画（全体概要）

（1）研究期間及び所要経費見込

研究期間：平成 16 年度～平成 20 年度（5 年間）

研究予算：平成 16 年度政府予算案 107 百万円

（2）研究計画の概要

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。その理由は、原子力の利用が広範囲に及ぶに至り低レベル放射線のリスクについて科学的な根拠に基づいた明確な理解が求められていることによる。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評価法の基礎作りのために低線量放射線と化学物質の複合効果を解析し、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

のであるかが理解できると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準作りの基盤ができる。

多くの科学技術に支えられた現代社会は様々な局面でリスクと背中合わせである。リスクが大きいときは早急な対応がなされるが、低いときは無視されがちである。しかし長期的かつ人類全体への影響を考えると低リスクも解明されなければならない重大な課題であるとする。低線量放射線影響について得られる本研究の成果は、放射線防護指針に対しより確かな科学的根拠を提供するだけでなく、低レベルの化学物質や環境汚染物質、非電離放射線など様々な要因による低リスク評価研究のさきがけになるであろう。他方、様々な環境ストレスに対応しそれに対する耐性を獲得するように進化してきた生命体が、人類の新しく生み出すストレスに対しどのように対応し得るのかを知る手がかりともなろう。

新原子力基盤クロスオーバー研究 研究計画書【詳述】

1. 研究テーマの背景、目的、目標及び意義

背景：低線量域放射線の生物影響について確かなデータを集めることが大切であることは認識されてきたが、実際に利用できるデータは量的にも質的にも非常に限られたものでしかない。例えば、マウスを用い最も精力的に遺伝的影響を調べた Russe¹らのデータでも 1Gy 以上の放射線照射データがほとんどである。また、線量率についても 10mGy/day が最低であり、これはバックグラウンドレベル (5 μ Gy/day) の 2 千倍に当たる高いものである。これに対し、2003 年、財団法人環境科学技術研究所ではバックグラウンドの 10 倍から 4000 倍レベルの放射線をマウスに 400 日間連続照射し寿命短縮効果を調べ、200 倍でわずかな効果を見出している。これは総照射線量においても線量率においても過去にない画期的なデータであり、注目されている。同研究所は現在発癌率についての影響を解析している。これらの研究は調査する低線量をバックグラウンドレベルに比較できるまで下げている点で高く評価されるが、課題は残っている。それはここで得られた情報がマウスの寿命という表現型を指標としたものであり、結果をそのままヒトに外挿できない点である。これを可能とするためには分子レベルでのメカニズム解明が必要不可欠であり、これを経て初めて納得のできる外挿が可能になる。このような観点から低線量放射線の影響を分子レベルで解明することが希求されている。

目的：本研究の目的は大きく分けて 2 つに分けられる。1 つは低線量域の放射線に対する生物影響を主にマウスを用いて分子レベルから調査することであり、このテーマはさらに放射線単独の影響と化学物質と放射線の複合影響の 2 つからなる。もう 1 つの目的は放射線影響の基本をなす DNA 損傷とその修復のプロセスをコンピュータシミュレーションにより *in silico* 化し、将来の総合的リスク評価法確立への足がかりを構築することである。具体的にはバックグラウンド放射線 (5 μ Gy/day) の約 10 倍に当たる 50 μ Gy/day から 4000 倍にあたる 20mGy/day にわたる放射線を 400 日間連続照射した時の染色体異常頻度、DNA 突然変異、mRNA の変化、蛋白の変化を解析し、線量効果関係、閾値の有無について明らかにするとともに、それらの影響の生物学的意義を明らかにする。急照射についての影響も調査し、線量率効果についても明らかにする。さらに、たばこの成分である NNK(4-methylnitrosamine-1-3-pyridyl-1-butanone) と低線量放射線の複合効果についても解析し、リスクの総合的評価システム作りに向けた基礎研究も行ってゆく。また最近放射線影響を解明する上で重要視されている適応応答とバイスタンダー効果についても低線量域での影響を解析する。さらに今回行われる生体反応の分子レベルでの素過程の解明の結果をコンピュータでモデル化することにより、より複雑な生体反応モデル構築への第一歩とするだけでなく、高次な生体反応の予測やマウスからヒトへの外挿に向けたモデル作製に向けた基礎作りをする。

このような研究により低線量域放射線影響の実体を明らかにし、これまであいまいであったこの領域での科学的リスク評価体系構築に向けた基盤作りをしたい。

意義：人類の原子力利用は様々な領域で大きく広がっており、今後もこの利用は拡大してゆくであろう。それに伴い、より多くの人々が放射線のリスクについて関心や不安を持つようになり、同時に行政的にもまた科学的にも放射線のリスクの実体がどのようなものであるかを明らかにする必要がある。20 世紀を通して放射線の生体影響は様々な角度から解明されてきたが、そのほとんどは高線量域放射線の影響についてであり、低線量域の影響についてはほとんど未解明という状況である。現在のリスク評価の基本的考えは高線量域で分かっている効果を低線量域へ外挿するというものであり、確かな科学的証拠に基づいている訳ではない。このような状況では人々の不安を解消することはできず、他方、リスク管理の方では不確かな「安全係数」をかけるという「無駄」を生じることになる。低線量放射線の生物影響の解明は低レベルでのリスク評価に対し科学的、合理的基盤を与えることにより社会的な安心を引き出し、また「安全係数」という経済的「無駄」を最小限にすることを可能とする。

2．研究計画の詳細（研究手法、年次計画、責任体制、分担体制、予算配分等）

本研究は、(1) 放医研 2 グループ、国立衛研、近畿大、東北大、環境研によるマウスでの低線量放射線への反応を解析するグループ、(2) 主に培養細胞を用い適応応答（理研）とバイスタンダー効果（原研・高崎）を調べるグループ、それに(3) DNA 損傷、修復についてコンピュータシミュレーションを行い（原研・東海）またその実験的裏付け（感染研、放医研）を行うグループの 3 つからなる。研究班としては 11 班からなる。

低線量放射線としては $50 \mu\text{Gy/day}$ を最小とし 1mGy/day 、 20mGy/day を基本線量として用いる。照射期間は 400 日を基本とする。また化学物質との複合効果を調べるため、NNK 投与と放射線照射を同時に行ったときの影響を解析する。ここでは 32 日間の照射を考えている。

マウスでの生体反応の指標としては染色体異常頻度（放医研）、突然変異頻度（近畿大、国立衛研、東北大）、mRNA（転写）（東北大、放医研）、蛋白質（放医研、国立衛研）を用いる。適応応答（理研）では突然変異と染色体欠失を指標とし、バイスタンダー効果（原研高崎）では DNA 損傷を、またモデルの検証実験（感染研、放医研）では培養細胞あるいは分離 DNA を用い損傷とその修復遺伝子の挙動を指標とする（模式図参照）。なお一部の研究では線質の異なる放射線による生物影響も調査してゆく予定である。

各研究班員は年に少なくとも 2 回は全員で集まり、進捗状況の相互理解、問題点の整理、研究の交流、などについて討議を重ね、より高い実績があげられるようにする。班員同士の交流も活発に行ってゆく。他方、国内外の関連する研究者との交流も積極的に行う。

3．期待される成果及び波及効果

本研究により、バックグラウンドレベルの数十倍から数百倍という非常に低いレベルでの放射線の生物影響がどのようなものかについて分子レベルからの理解が可能となる。

具体的には DNA の損傷、修復、突然変異生成、染色体異常生成、遺伝子発現の変化、間接効果と適応応答の関与の、生体全体としての低線量域放射線影響の基本的な機序が理解できるようになるであろう。また調査する線量は現行の職業人に対する年間許容線量（自然放射線の 10 倍程度）あるいは宇宙ステーションでの被曝線量（自然放射線の 100 倍程度）に相当するものであり、そこでのリスクをより直接的に推測し得るデータを提供することになり、大きな波及効果が期待できる。さらに本研究の結果は、現在さまざまな環境要因のリスク評価で行われている低レベルでのリスクの「推測」に対し、実験的なアプローチによる「実証」が可能であることを示し得る点でも大きな波及効果が期待できる。特に、化学物質と放射線の複合効果の解析はヒトの実生活で受けるリスクのより具体的なリスク評価に欠かせない情報であるし、またコンピュータ上でのモデル化もリスク評価の最終的な形につなげるために不可欠であり、波及効果は大きい。さらに本研究ではマウスの生涯の約半分に相当する長期（400日）照射の影響を調査するので、結果の一部は個体の老化過程の理解にも資する可能性がある。

4．連携機関以外との研究交流、国際的展開及びそれらを通じての成果等の波及効果

研究の推進、発展にとって他の研究者との交流は不可欠である。外国及び国内の関連する研究者との交流、討論さらには共同研究を活発に行い、研究の質の向上に努める。具体的には、研究分担者同士の交流を密に行うだけでなく、国内、国外の関連する研究者を招聘してのワークショップやシンポジウムの開催、国内及び外国の学会、シンポジウムへの参加、国内外の研究者との共同研究などを積極的に進めてゆきたい。特に初年度においては研究の方向性についてより深くかつ洗練された視点を作り上げるべく、国内外の関連する研究者を集めた国際ワークショップ開催を計画している。また具体的な海外の研究協力機関としてはフランス CEA Fontenay-aux-Roses 研究所、中国放射線防護与核安全医学所、米国ロスアラモス国立研究所、米国コロンビア大学、米国ノースウェスタン大学、などを計画している。国内的には高エネルギー加速器研究機構、電力中央研究所、産業創造研究所などと情報交換や研究交流を行い、より高い成果が得られるようにしてゆきたい。

また研究成果の波及のためには年度ごとの成果のとりまとめとレポートの作成の他に、国内外での学会、シンポジウム等での発表、国際誌への投稿、掲載、などを通じ積極的に外にアピールしてゆきたい。

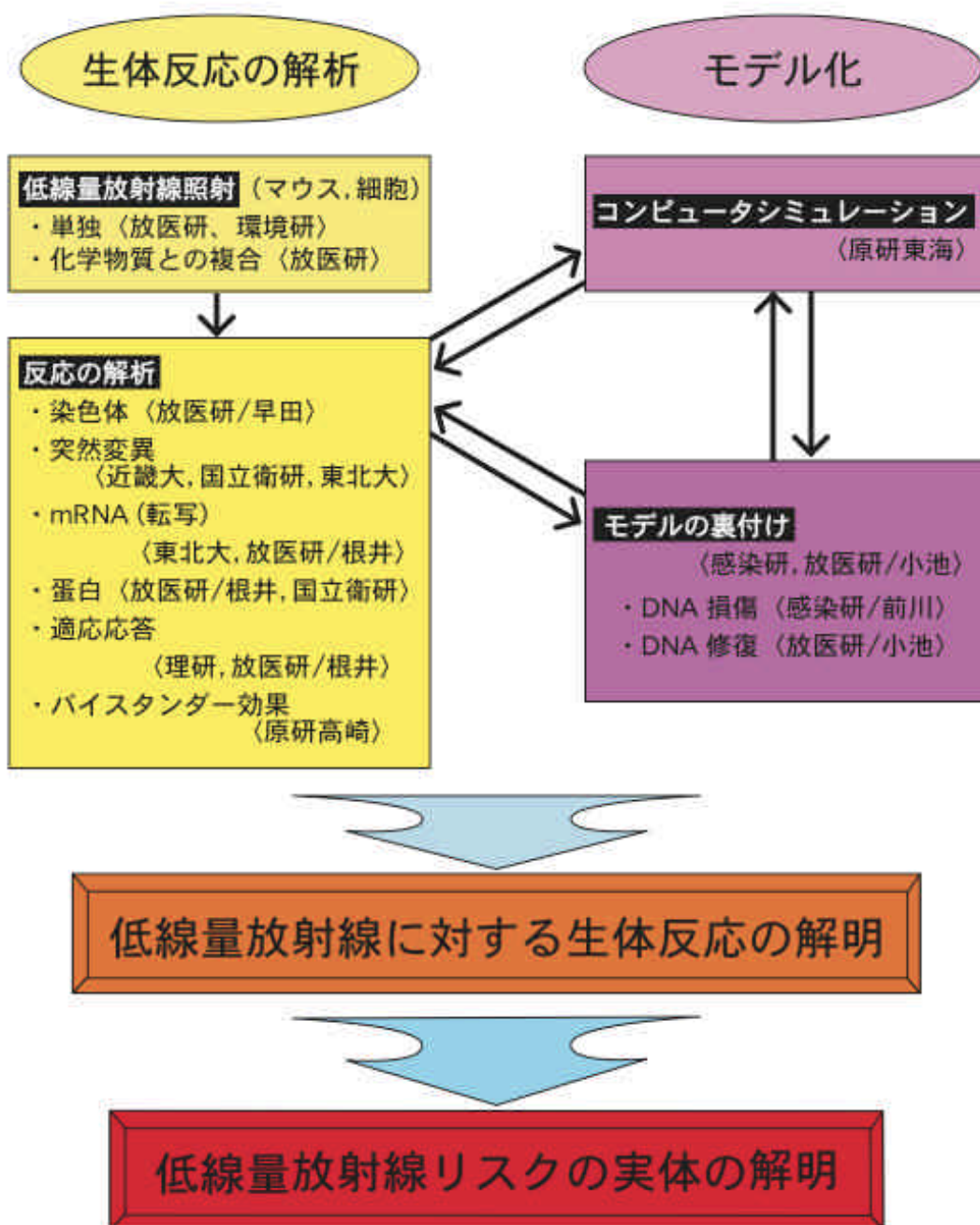
5．予想される困難と対処方針

実験遂行上予想される困難としては、マウスの長期飼育が第1にあげられる。マウスは特定の感染がない状態で 400 日間長期飼育しなければならないので、この間に感染が起これば始めからやり直しをしなければならず、研究の進行が遅れることになる。これへの対処としては、実験の再開が速やかにできる体制をとっておくことである。また mRNA や蛋白の解析技術の進歩はめざましいものがあり、常により有効な方法を取り入れるように配慮してゆく必要がある。他に、実験データの解析上予想される最大の困難は放射線量が少ないため、検出できるシグナルの程度が低くノイズと区別できなくなることである。この

点に関しては線量を変えて影響を調べる（dose-response をみる）ことにより、ある程度の解決ができると思うが、状況に応じて統計処理の専門家の助けを受ける必要があるであろう。またマウスの系統による差、マウスとヒトの差にも充分注意を払いながら研究を進める必要がある。

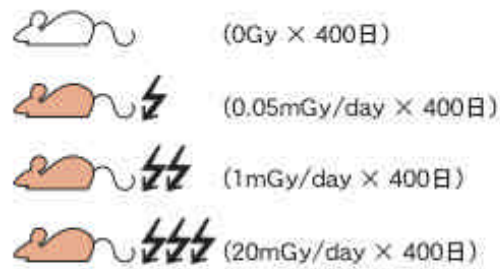
なお、研究の進展具合によっては、より良い方向性を確保するため、研究計画のある程度の変更も大胆に考えてゆきたい。むろんその時は研究評価ワーキンググループの承認を受けて行う。

低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析



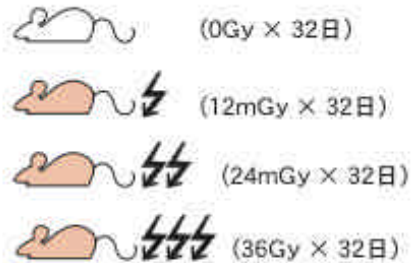
マウスの照射

(1) 低線量長期照射



(2) 低線量放射線と化学物質の複合効果

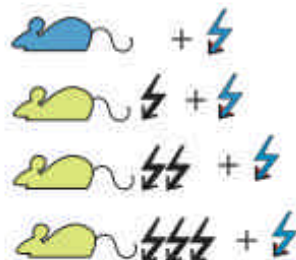
放射線



化学物質

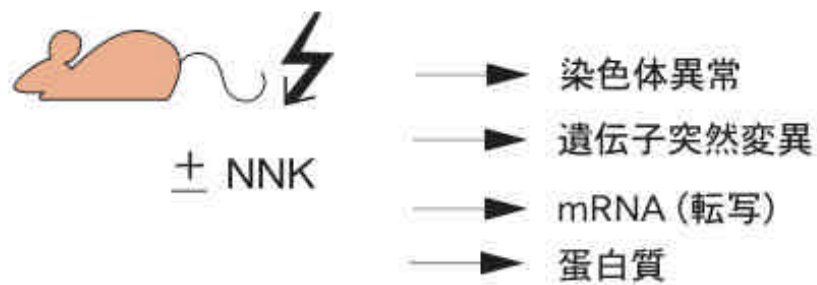


放射線と化学物質

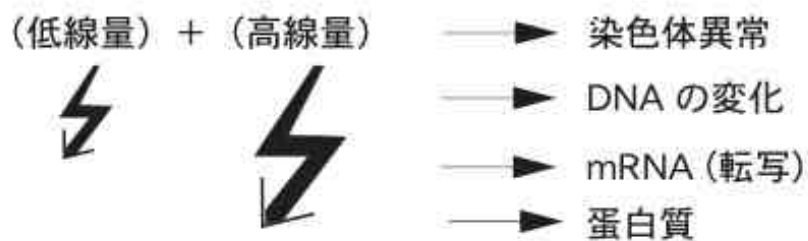


生物の指標

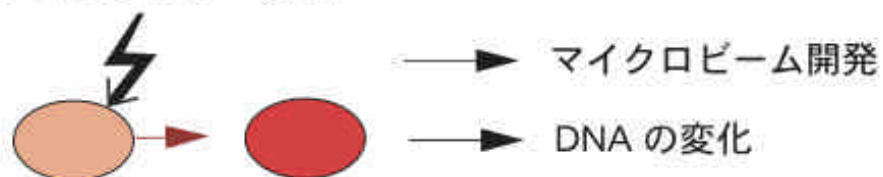
(1) 低線量放射線単独、化学物質との複合効果



(2) 適応応答

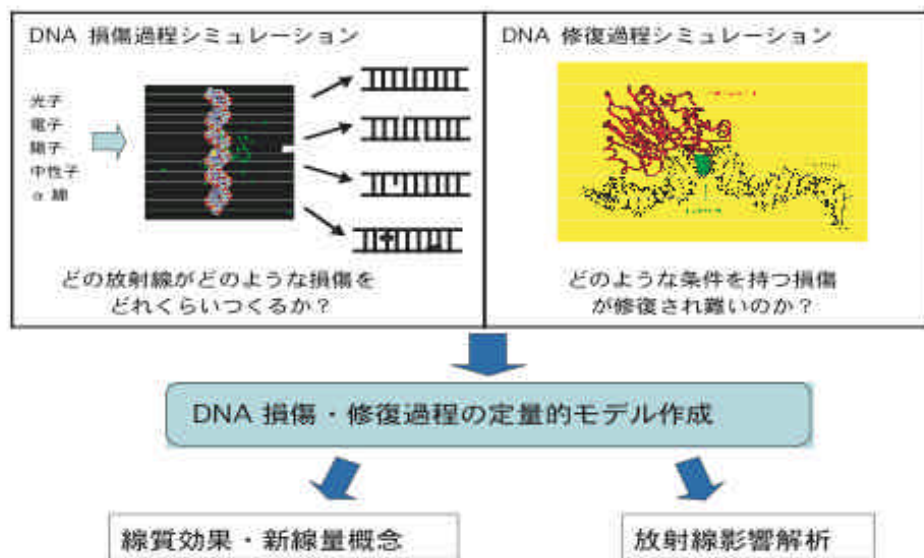


(3) バイスタンダー効果



モデル化

- (1) DNA 損傷の生成プロセス
- (2) DNA 修復プロセス
- (3) DNA 高次構造、クロマチン構造の影響
- (4) DNA 修復に関与する因子の解析



新原子力基盤クロスオーバー研究 研究計画書【概要】

1. 研究テーマ名

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

2. プロジェクトリーダー（P L）の氏名・所属等

氏名：木下 幹康

(財)電力中央研究所 狛江研究所 原子力システム部 上席研究員

3. 研究実施機関名（代表者氏名）

【幹事機関】 日本原子力研究所	(更田 豊志)
(連携機関) 電力中央研究所	(園田 健)
(連携機関) 東京大学	(陳 迎)
(連携機関) 北海道大学	(西浦 廉政)
(連携機関) 九州大学	(松村 晶)
(連携機関) (独) 物質・材料研究機構	(田淵 正明)

4. 研究計画（全体概要）

(1) 研究期間及び所要経費見込

研究機関：平成 1 6 年度～平成 2 0 年度（ 5 年間）

研究予算：平成 1 6 年度政府予算案 1 0 7 万円

(2) 研究計画の概要

原子力の特徴のひとつは、燃料を取替えることなく長い期間（たとえば発電なら 2 年間）エネルギー生産を続けられることにあります。具体的にこれを実現するには長寿命の燃料を開発しなければならず、とくに燃料材料の形や体積の変化が小さいことが要求されます。

軽水炉発電では、1 9 8 0 年代に入ってからこの長寿命化（高燃焼度化）の開発研究が盛んになり、その結果興味ある大きな発見がありました。それはウラン原子の約 7 % が燃焼した時、燃料セラミックスの結晶にカリフラワーのような組織（有限フラクタル）が発生する現象です。このような形がつけられることは、生命誕生や進化と関係があると言われている自己組織化・臨界現象が、原子燃料のように最も強い放射線の中（照射・高線量）でも引き起こされていることを示唆しています。

実は原子燃料に使っている燃料セラミックス材料（二酸化ウラン）は 1 9 5 0 年代に経験的に見出されて、約 5 0 年も発電用原子炉で使われてきたのですが、その高性能の理由を明らかにする研究はあまりなされていませんでした。

本研究の第一の目標は、この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、新しい安定な状態を作り出す機能（自己組織化）をあらわす数学的な方程式系（モデル）を見出すことであり、そのモデルを検証することにあります。

第二の目標はこの現象を予測して制御する技術の開発です。カリフラワー構造は、照射のエネルギーによって界面（平面）が2重3重に発生して作られたと考えられます（創発的な秩序化過程）。ここには原子炉のなかでの金属構造材料に起きる亀裂発生とも共通する基本プロセスがあり、その制御は、燃料の長寿命化だけでなく照射エネルギーを受けるすべての材料に共通する技術につながる可能性があります。

研究は実験科学、計算科学、応用数学などを総合して行います。今までの科学の常道である分析的方法だけでなく、生命や進化を理解するため最近議論されている創発・周辺制御の科学のアプローチ（M.ポラニー、蔵本などによる）を用い、全体と部分との仕組みや役割の互いのからみあいを見つめた（ホリスティックな）捉え方の実例をこの照射効果の研究の中で示したいと考えています。

原子炉の中の照射環境で材料が変化するプロセスと取り組むには、非線形事象の予測技術や複雑系を扱う新しいエンジニアリング（先見的工学）が必要と考えられています。これはヒトの寿命や健康を扱うのと同じ類の技術であり、本研究でこの先見的工学に一步を踏み出し、たとえば新技術を原子力発電所の現場に迅速かつトラブルを起こさずにもちこむことや、運転中の原子炉の健全性維持（ノートラブルとすること）に寄与したいと考えています。

新原子力基盤クロスオーバー研究 研究計画書【詳述】

1. 研究テーマの背景、目的、目標及び意義

背景：

軽水炉燃料の材料として二酸化ウラン(UO_2)が使われ始めてから約50年経過したが、その高性能（燃焼にともなう体積変化がなく核分裂生成物を外に出さない）の理由は物理的にはいまだに解明されていない。Matzkeらによりイオン結晶性の高い UO_2 では核分裂粒子（約80 MeV）の電子励起に損傷を修復する作用があることが指摘されている。1985年頃、高燃焼度の軽水炉燃料ペレットの周囲に、細粒化／リム組織／カリフラワー構造とよばれる組織が発見された（図1）。そこでは結晶粒径が製造時の10～20 μm から約0.2 μm 程度に細粒化し、約1 μm 径の気泡が1～2 μm の間隔で散在している。

一方、原子燃料の高燃焼度化を進めるにあたって、燃料の被覆にジルカロイ合金を用いる軽水炉燃料では、燃料健全性を保つため燃料と被覆管の機械的相互作用を低く維持することが要求される。とくに高燃焼度では多量の核分裂生成物が燃料材料内部に蓄積し、その体積膨張は燃料破損の原因となりうるが、上記の組織変化がおきると大きな体積膨張が生じる場合が見出されている。したがって、新組織形成プロセスの把握は高燃焼度にむけた燃料材料の改良や燃料健全性評価にとり重要である。

最近この現象の発生条件が実験的に明らかになり（図2）、温度約1100℃より低い温度でのみ生じることが確かめられた。この温度は融点より十分に低いためメカニズムは非熱的過程であり、また核分裂のエネルギーが結晶欠陥の生成と修復の両方に働く、ある種の非平衡循環系である（図3）。とくにカリフラワー構造（有限フラクタル）が発生するプロセスには生命現象に似た非線形プロセスが見出される可能性もあり、照射下の材料ふるまいの研究に新たな世界が開けることが期待される。

目的、目標：

原子力発電所の現場で用いられている構造・燃料材においては、ときとして予想外の材料挙動（組織変化、亀裂発生、腐食、水素吸収など）を現出することがあり、その予測と制御のためのエンジニアリング（先見的工学）が求められている。高次の非線形の効果は長時間・高線量を受けた後に現れることが通例である。したがって、原子炉の中で使われる照射下の材料にはかならず“複雑系”が攪乱要因として埋め込まれているという認識が不可欠である。なかでも原子燃料セラミックスの炉内ふるまいでは照射・高線量の効果が本質的であり、その研究にあたっては真正面から照射効果と取り組むことが要求される。

本研究の第1の目標は、原子燃料セラミックスの細粒化・カリフラワー構造形成の基本プロセスである“照射下の界面の形成”のメカニズム解明である。これは被覆管材や構造材の亀裂発生や脆化のもととなる面状欠陥の形成に共通する一般性のある現象である（図4）。そこで、基本となる2次元欠陥複合体の発生の動力学（2次元析出のダイナミクス、析出過程）の数学的な定式化を導き、実験でこれを裏書きすることを目指す。第2の

目標は、照射下での界面形成に対して、できるだけ一般性のある定式化を導き、かつ実用的な予測計算手法（計測を含むシステム）を提案することである。

とくに後者に対しては、研究資源を有効に集中するため、自発的秩序の生成すなわち長距離のコヒーレンスが生まれる現象（整った状態のスケールが原子集合からマイクロメータ程度まで急速に拡大していく現象）の基本過程に的を絞る。その上で発電所の現場などで生起している照射下・高線量での類似の現象（構造材の亀裂発生など）に対しこれを分析してエンジニアリング的な適用性のある手法を見出したい。これにより非線形現象や複雑系と取り組むため提唱された、内部状態を探索しつつ外から多面的に操作を加えるという新しい考え方の工学「先見的工学」の一步に貢献することとしたい。また、さらには重照射・高線量の現象と生命現象との類似性を視野に入れて検討し、その取りまとめにも挑戦したい。

意義：

原子燃料技術に於いて、集合体最高燃焼度で $65 \sim 70 \text{ MWd/kgM}$ を超える将来の高燃焼度化では、燃料セラミックスの大きな体積割合が細粒化/リム組織/カリフラワー構造に変化する高照射領域に入る。本研究によって組織変化のメカニズムが解明され、細粒化が材料学的視点から予測可能になれば、燃料材料改良による高性能化や高信頼化が可能性となると期待される。これが実現すれば、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より経済的な利益が得られる。

また、照射下・高線量の非線形現象に対して、照射エネルギーによる拡散加速、結晶欠陥の生成、自己修復プロセス、界面形成などの循環モデル（縮約方程式）が開発できれば、原子炉内の類似現象の予測・制御に道が開けると期待される。とくに原子力発電の現場に於ける攪乱要因のひとつである照射下の材料ふるまい（組織変化、亀裂発生、腐食、水素吸収など）に対して、これを管理し制御する方策に道がつけられると期待される。

2. 研究計画の詳細（研究手法、年次計画、責任体制、分担体制、予算配分等）

本研究では、照射に対する新しい見方および切り口で、新しい活性化したグループを作り育てつつ成果をあげていく。そのため国内および国際的に活動的な議論の場を設け、理論と実験の生きたネットワークを構築する。初年度は手始めとして、6つのサブグループに分けて実施する。実験に2グループ、理論と計算解析に3グループ、とりまとめに1グループである。実験は加速器によるシミュレーションと実燃料を用いた試験からなる。理論解析は第一原理ならびに分子動力学計算、数学的研究、ならびに計算コード開発とからなる。図5に研究課題の相互関係と研究の流れを示す。

実験は加速器実験を主とする。原研のタンデム加速器、東大のHITを用い、必要に応じてイオン注入装置の利用を検討する。観察は電中研、九大の高分解能電子顕微鏡と関連装置を用いる。通常は大きな予算が必要なホットラボ実験さらに炉内実験についても的を絞り且つ革新的な手法を鋭意探索し、その適用を検討する。計算科学では、第一原理計算と分子動力学、必要に応じて熱力学的な解析も実施する。北大での数学的検討によって、カリフラワー組織の形成メカニズムと目される散逸構造について、縮約理論による解析を行う。予測モデルの計算コード開発に向けて、フェーズフィールド、セルラーオートマトンの手法を適用可能なモデル開発環境を、原研を中心に物材機構、(株)情報数理研究所、新日鉄ソリューションの協力で構築する。原子燃料材料の照射下ふるまいをひな型にした新しいエンジニアリング（先見的工学）の構築に向けては、電力会社による協力および事務局を設置しての国際ワークショップ開催により、国外専門家の協力も得てとりまとめをすすめる。なお、本研究の分担機関及び分担者は、北海道、九州、大阪、東海、東京と分散している。そこで東大に隣接して事務室を設置し、東京近郊への出張に会わせて随時連絡会議が開ける環境をつくるとともに、TV会議設備（インターネットサーバーなど）を設置して遠隔会議が開けるようにする。とくにTV/電話会議は国際的な打ち合わせにも利用可能とする。

本研究の内容はきわめて挑戦的なものであることに鑑み、事前評価にて指摘されたコメントを念頭に置きつつ、研究の進捗に応じて得られた成果を正確に把握すると共に、国内外の研究者との研究交流をすすめ、柔軟に共同研究や研究グループ育成を行い、研究全体の定量的な目標を逐次明らかにしていきたい。

3. 期待される成果及び波及効果

本研究は6課題で実施し各々の関係は以下のとおりである。図5に研究の流れを示した。

「発電現場における新しいエンジニアリング概念の構築」

本研究の統合とりまとめテーマであり、原子力発電の現場との接点で、新しいエンジニアリング（先見的工学）への道が明示できると期待される。

「メゾスコピック材料診断・予測・制御コードの開発」

照射下の界面形成の予測・制御のための解析ツール、計算コードが開発されると期待される。その実施には以下の課題から得た数学的枠組みや、速度論的情報を用いる。

「照射・高線量効果の縮約的な解析理論の構築」

照射下の界面形成の非線形方程式系の構築が期待される。その実施には、計算科学的方法から得られる速度論的知見を用いる。

また、界面発生（polygonization など）を扱うフェーズフィールド法の数学的枠組みの開発が期待される。ここで表面張力にもとづく相境界などの界面の動力学には既存の理論が存在するが、散逸系において界面が自発的に発生するプロセスの理論はみあたらない。したがって、数学的な理論が構築できるだけでも、大きな成果であると考えている。

「計算科学的方法による自己損傷回復プロセスの解明」

原子燃料セラミックスの基礎過程について、主として速度論として学問的な整理が期待される。ここで反応速度論方程式系を構築できれば、それをもとに上記の縮約解析が可能になる。

「加速器を用いた損傷回復・組織形成プロセスの実験的研究」

照射において材料がもつ自己修復作用（回復現象）について詳細な知見が得られると期待される。とくに従来の核分裂トラックによる過熱焼鈍という単純な描像ではなく、カリフラワー構造をもたらす秩序化プロセス（自己組織化）をもたらす、照射の新たな可能性に技術的な門戸が開かれる可能性がある。

「原子炉・ホットラボを用いた損傷回復・組織形成プロセスの実験的研究」

大幅に高い燃焼度の燃料のホットラボ試験はほとんど行われておらず、我が国でとくに細粒化の観点から詳細な試験ができるとすれば画期的である。さらに燃料セラミックスのリアルタイム炉内計測（電気伝導度など）は過去に実施例が無く、実現性はきわめて難しいが、メカニズム解明を大きく進めるため挑戦する価値は大きい。

本研究の結果、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が可能になり経済的な利益が得られると期待される。また、先見的工学が一步前進し、材料中の非線形現象の理解が深まれば、原子燃料および類似した非線形性の事象に対して、発電所の運転管理上の攪乱要因となる事象を回避できるようになると期待される。

4. 連携機関以外との研究交流、国際的展開及びそれらを通じての成果等の波及効果

国内に於いては電力会社、燃料メーカー等の専門家と積極的に交流を行い、過去に行われた燃料研究で蓄積されたデータを生かすとともに、高燃焼度燃料の実用化にむけて解決すべき技術課題について意見交換を行う。さらには原子炉構造材料の照射研究や、核融合材料の照射研究におけるこれまでの成果を取り入れていきたい。

また、本研究の国際協力では、理論的課題については早急に共同作業を開始し、実験的課題については協力候補者との協議をすすめ、緊密に実施する。とくに、数学的解析では有能な研究者を短期招聘してブレイクスルーを得るよう迅速な活動を行う予定である。研究提携機関は、UCLA（米国）、ブラッセル自由大学（ベルギー）、超ウラン元素研究所（EURATOM）、EDF/CEA（Saclay, Cadarache）（仏）、スタズヴィック研究所（スウェーデン）などである。初年度にはこれらの機関から専門家を招聘し、国際ワークショップを開催し徹底的な議論を行い、プロジェクト全体の方向性、並びに個々のサブテーマの役割を精密に定めることとしたい。

また、国外の国際会議での情報収集、たとえば米国原子力学会の軽水炉燃料専門家会議（フロリダ）での細粒化研究の最近の情勢などの収集を行う。また、原子燃料に関する第一原理計算や、放射線耐性の実験技術情報などを国際会議から収集する。本研究の成果の蓄積にともない、第3年度にはよりおおきな国際会議を国内で開催することを計画している。研究成果がまとまりしだい研究論文の外国雑誌への投稿を積極的に実施することにより、成果の積極的な発信を行っていきたい。

5. 予想される困難と対処方針

本研究の期間は5年であり、そのなかで成果をあげるためには研究の焦点を絞ることが最も重要である。このために、ひんばんな遠隔地TV会議を開いたり、個別の情報交換を積極的に奨励していきたい。

研究の進捗に伴って、研究課題の中で、実験的にも理論的にも、不安定性、自己組織化、秩序化(ordering)のプロセスが複数見出されると予想される。これらは比較的ありふれた現象であり、それが本研究で問題としている現象の主プロセスと関係がない場合が往々にしてある。したがって、ここでは細粒化・リム組織・カリフラワー構造の形成のプロセスのどの部分を成すか、または関係無いか、冷静に論理的に判断する必要がある。

加速器実験による細粒化・カリフラワー構造の再現においても、原子炉の中で起きる真の原子燃料の主プロセスとは異なるプロセスで同じ結果が出る可能性もある。したがって模擬試料をつかう実験では、メカニズムの視点にたって、試験マトリックスを戦略的にやや広く取り、異なる物質間の傾向の違いなどをもその再現性の判断材料とする工夫が必要と考える。とくに、複雑系としての材料ふるまい研究においては、個別事象がいかに関係詳細に解明されても、総体のふるまいは直ちには解明されない。本研究では実機材料でのデータと模擬材料ふるまいとの比較を、解明の進んだメカニズムモデルによる

視野のもとで行い、“こと”が起きる条件を精緻に整理する（地図、状態図、分布図などを描く）ことでこの困難に対処したい。

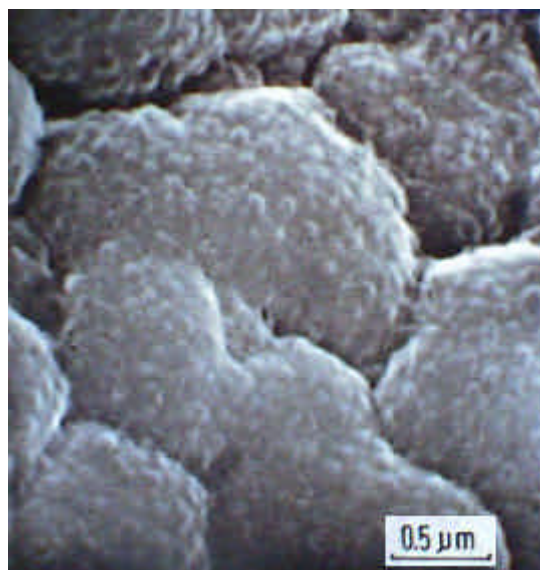
反応速度論方程式系の構築においては、本研究の範囲内では多くの速度論係数が不確定のまま残ると予想される。ここでは、実験と計算の組み合わせを良く工夫して、値のオーダー推定までは踏み込めるようにしたい。

シミュレーションモデルの開発では現象を的確に表し、しかも単純化された非線形数学モデルの開発が最も困難である。できるかぎり実験と計算科学からの知見とデータ支援に期待し、情報をいち早く共有して、妥当性の検討を進めたい。

先見的工学の構築には発電現場において材料の管理制御の意識を変えるくらいの明確な結果を出せるかどうか大きな壁がある。電力による評価と批判によく耳を傾けて、また照射・高線量領域での材料中の非線形現象についての原子力技術者への周知にもつとめて、この壁を乗り越えるよう努力する。



(a)カリフラワー（本物の野菜）



(b)UO₂燃料 (7.9%FIMA)
細粒化リム組織

図 1. カリフラワー構造

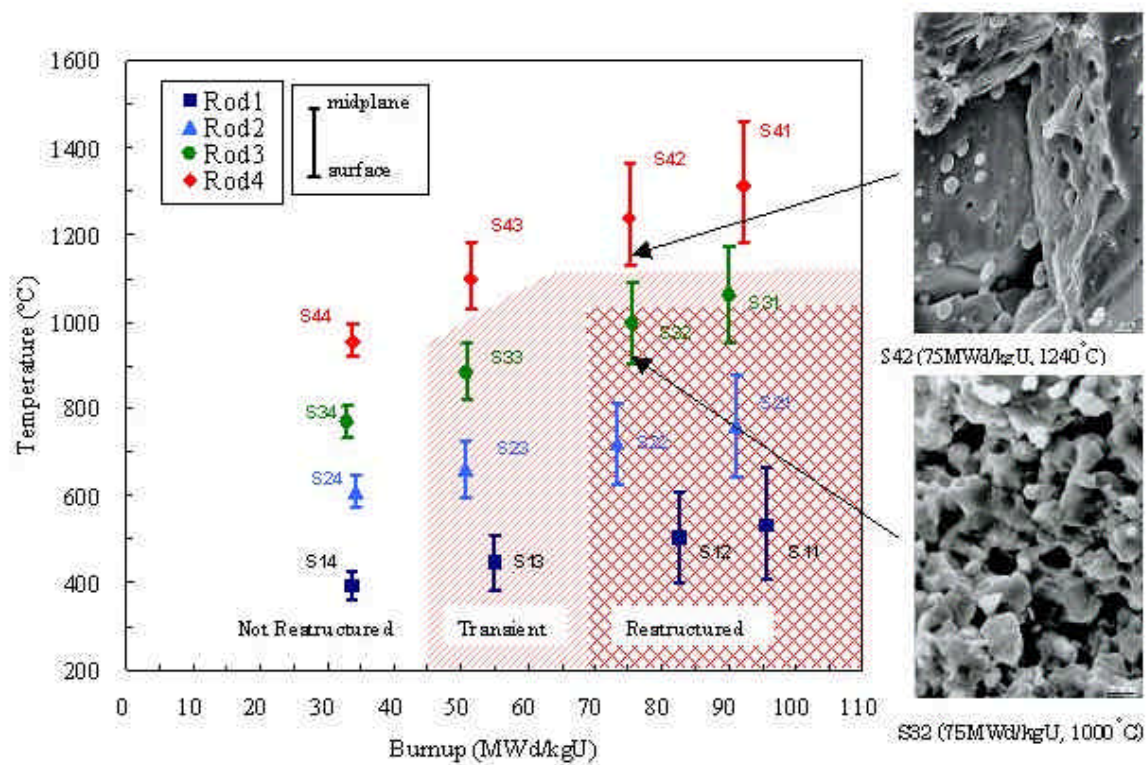


図2 . 細粒化・リム組織(カリフラワー構造)が生じる温度・燃焼度の領域

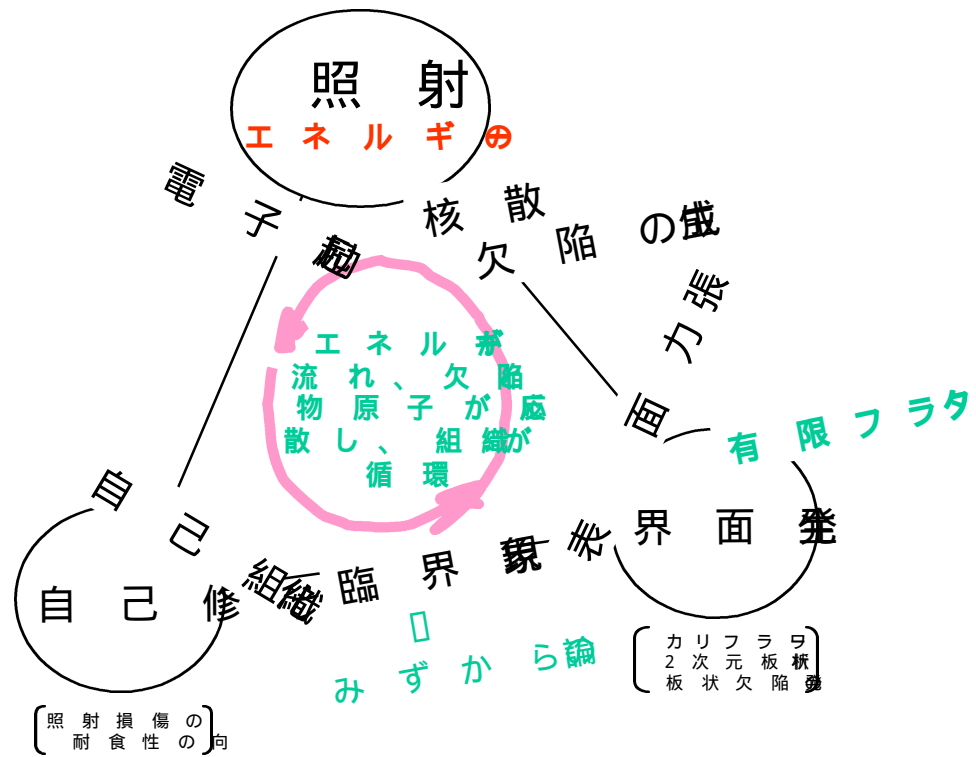
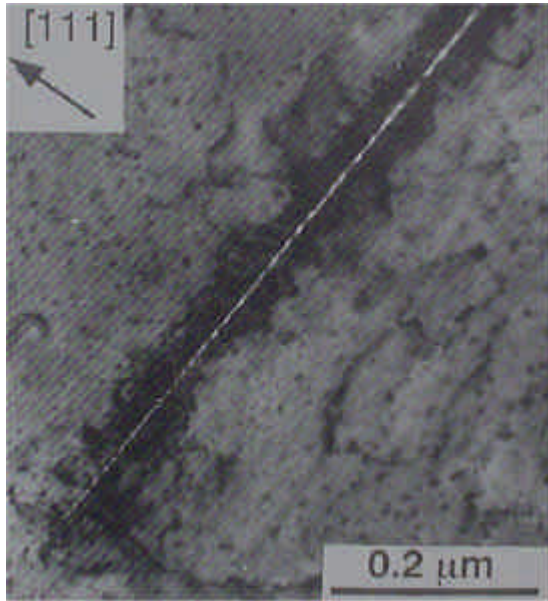
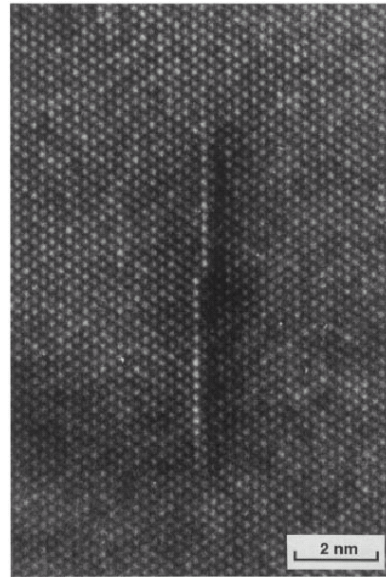


図3．投入エネルギーと結晶欠陥の循環
によって界面（形態）が発生する



(a) 高燃焼度 UO_2 燃料で観察された
面状欠陥(L. Thomas, 1992)



(b) 界面の析出による形成例;
Al 中の Cu の単原子層
(GP ゾーン)(KARLIK, 1998)
但し燃料と直接の関係はない例

図 4 . 平面状 (2 次元) の欠陥構造・析出物の観察例

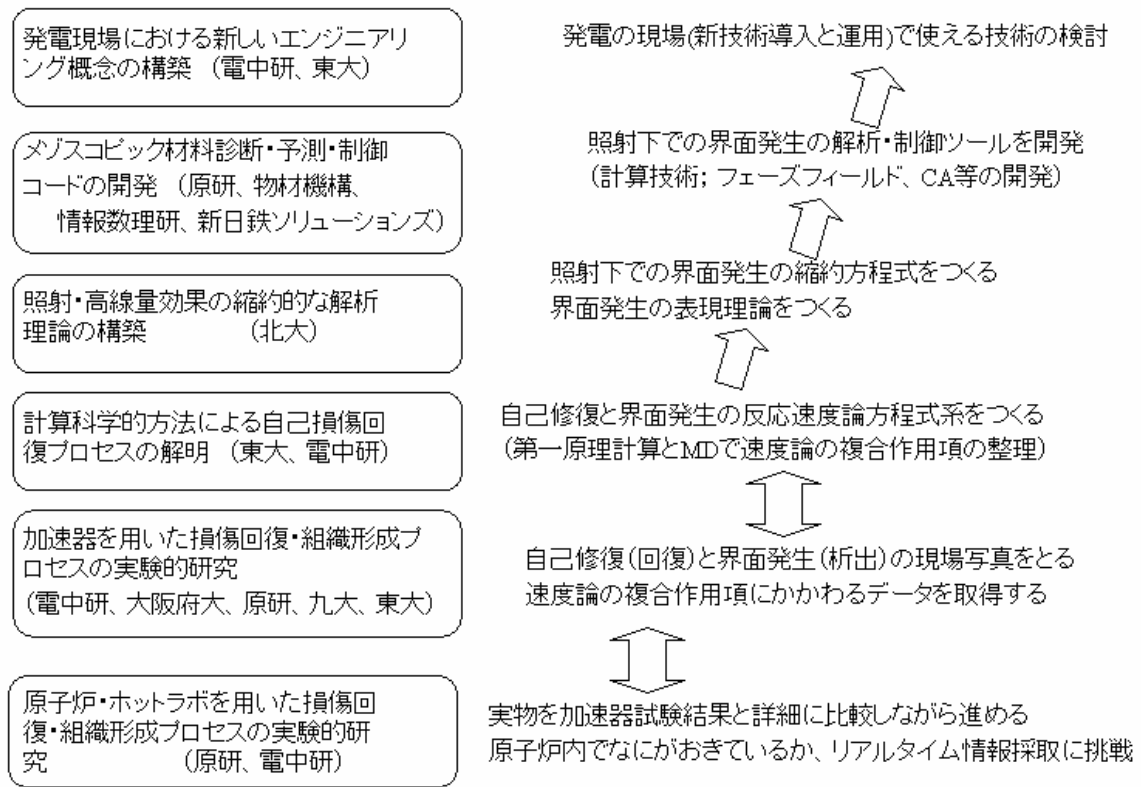


図 5 . 研究課題の相互関係と研究の流れ