

## 原子力基盤クロスオーバー研究 研究構想

1. 課題名 (プロジェクトリーダー 氏名) 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)			
2. 構成機関及び研究担当者[注1]		[注2]	
機関名: 東京大学	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 日本原子力研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 北海道大学	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 九州大学	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 理科大	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 電力中央研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 電力会社	所属:	担当者氏名:	担当:
3. 研究期間 平成16年 4月 ~ 平成21年 3月 ( 5年計画 )			
4. 研究予算および研究者数			
	研究予算	研究者	
平成 16年度	120,000 千円	20 人年	
平成 17年度	( 予定 ) 120,000 千円	( 予定 ) 20 人年	
平成 18年度	( 予定 ) 120,000 千円	( 予定 ) 20 人年	
平成 19年度	( 予定 ) 120,000 千円	( 予定 ) 20 人年	
平成 20年度	( 予定 ) 120,000 千円	( 予定 ) 20 人年	
合計	( 予定 ) 600,000 千円	( 予定 ) 100 人年	
5. 研究目的・目標[注3]			
<p>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、ときして予想外の材料挙動 (亀裂発生、腐食、形状変化など) を示すことがあり、原子力発電の信頼性を高めるために新たなエンジニアリングが求められている。そのひとつの切り口として、照射・高線量領域での材料挙動に対して、ナノスケールで始まるクラスター化が、材料全体にひろがったマクロな挙動として発現する非線形的に進む巨視的状态への移行過程を、自己組織化的なプロセスとして捉える方法がある。</p> <p>このプロセスの制御においては、線型性を仮定した予測手法による決定論的な制御方法は有効ではなく、使用現場の状況に合わせたホリスティックなアプローチによる新たな制御手法の開発が望ましい。本研究ではその手始めとして照射に対する材料固有の自己修復機能などの材料挙動に関する知識をできるかぎり獲得するとともに、現場の状況因子を取り入れ、現場においてシミュレーションを可能とする手法を開発する。</p> <p>現実に自己修復機能が発現している典型例として核分裂照射下の原子燃料セラミックス材料がある。すなわち核分裂に伴う80MeV程度の核分裂片による照射のもとで、十数時間で1Dpaに至る急激な損傷量にもかかわらず結晶構造を安定に保ち、体積増加もなく核分裂エネルギーが熱化されている。そのメカニズムは照射下での結晶再生機能にある。また数年の炉内燃焼の後には結晶マトリックス内で飽和した核分裂生成物 (Xenon等) の保持が続けられるように、自発的に結晶構造を細粒化させカリフラワー構造と呼ばれるフラクタル的構造をつくり、より高燃焼度でも安定な結晶組織に変化する。本研究ではこのセラミックス燃料挙動を作業用の研究対象とし、照射・高線量による影響を定量的かつ多面的に解析し、その特性を明らかにしたい。具体的には</p>			
<p>(1) 照射・高線量下での自己修復プロセスがみられる材料 (原子燃料セラミックス等) について、発電現場環境での材料のトータルライフ挙動を、即時的にシミュレーションするコードを開発する。</p> <p>(2) 発電現場での材料挙動を把握する手法について、高線量下での自己修復挙動に着目してこれを創案し、現場適用の可能性を評価する。</p> <p>(3) 計算科学的方法を用いて、ナノスケールから巨視的状态への自己組織化的な非線形的過程について、作業対象を特定しメカニズムの解明を進める。</p> <p>(4) 非線形数学的方法を用いて、材料の制御を可能にするしきい条件等の相関式表現の導出を進め、シミュレーションコードの要素に用いる非線形プロセスモデルにとりまとめる。</p> <p>(5) 実験観察として加速器や電顕観察等によりナノスケールでのデータを取得し、プロセスモデルの検証に用いる欠陥構造生成から巨視的構造の発生に至るデータを取得する。</p> <p>これらの解析と開発作業により、現場で用いられている構造・燃料材の挙動につき、自律的なものも含めその予測制御にむけた一歩を進め、ナノスケールの知見と数学的論理にもとづいて、原子力発電所の安全性・健全性を管理する立場でその説明責任が果たせるようにすることが本研究の目標である。</p>			

## 6. 研究計画・研究内容[注4]

- (1) シミュレーションコードの開発については、計算目的の構築と設計およびプログラミング作業を構成要素となるサブモデルの開発にあわせてすすめる。作業は東大(本郷)をその拠点として関連する研究機関の密接な連絡のもとで有機的に進める。
- (2) 材料の挙動を発電現場で把握する手法については、電力会社の協力を得て軽水炉発電の発電所現場の因子を調査し、電力中央研究所において燃料材料(セラミックス材、被覆管材)の自己組織化的なプロセスの因子との相互関係を解析し、観測方法を創案して現場でのシミュレーション融合の観点からこれを評価する。
- (3) 計算科学的方法については、照射による結晶欠陥構造の発現 - ナノ構造の発生 - ミクロ構造への発達、の各ステージについて、部分要素に分けた素過程の解明と、自己組織化の計算機による再現方法の開発と、2つのアプローチを平行して進める。前者では第一原理分子動力学法、後者ではキネティックモンテカルロ法等を主として適用する。この研究には、理科大、東大、電中研が主として関わる。
- (4) 非線形数学的方法については、プリゴジン学派の開発した非線形反応速度論方程式系の解析手法をもとに、セラミックス材料での細粒化現象を研究対象にして、非線形メソスコピック材料理論の領域の開拓を進める。Goniem-Walgraefの方法を中心に照射欠陥・転位等の反応速度論を計算科学的方法から得たデータをもとに開発を進める。九大、北大、東大、電中研が主に関わる。
- (5) 実験観察については、核分裂片照射の効果に関するセラミックス照射観察試験を実施する。細粒化再現の試みとして50~150MeVの希ガス原子(Xenon)等を二酸化ウラン模擬物質(CeO<sub>2</sub>)に照射して、核分裂トラックによる照射損傷の詳細を高分解能電子顕微鏡で観察する。核分裂生成物の蓄積シミュレーションのため希ガス原子のイオンインプランターによる打ち込みの併用を行う。これにより、電子励起とカスケード損傷の2つのモードの格子損傷への影響を観察する。また、高照射量で照射した試料を再度照射することによって、核分裂片が通過することによる照射損傷の回復(瞬時高温化による焼鈍)を観察する。この研究には、原研、九大、電中研が主に関わる。

## 7. 期待される成果・波及効果(原子力研究開発・科学技術全般への波及効果等)[注5]

本研究は、発電所の現場に於いて発生する照射・高線量領域において、その発生の予想が困難であった事象に関して、現場の環境因子をもとにナノスケールのプロセスの知識を基盤において予測するあたらしい技術の礎をつくることを目標にしている。とくに創発的挙動(ここではプロセスの個々の要素の挙動からは演繹的に予想できず、要素が統計的な大数集合して始めて発生する挙動を言う)は、現場で起きる多くの現象の一部ではあるが、その予想が可能になれば、手法をさらに一般化することで、これまでのエンジニアリング課題のいくつか(燃料セラミックス材の細粒化、燃料被覆管の水素脆化、被覆管のノジュラー腐食、原子炉配管の放射化学的環境下の応力腐食割れ、)の制御への第一歩を進めることができる。これにより既往の知見との融合による安全で効率的な材料活用、材料挙動制御のためのエンジニアリング手法が開発されると期待される。

## 8. 関連研究の国内外の状況[注6]

原子力発電に用いる材料の制御に関しては、とくにフランスE d Fのフォンテンブロー研究所において、燃料材料および压力容器材料のシミュレーションコードの開発が十数年来続けられており、さらに欧州議会の予算等を潤沢に用いたプロジェクトが2004年から開始される。ここでは即時的(インタラクティブ)シミュレーションコードの開発がその成果として期待されている。とくにフランスの特徴として第一原理計算をジルコニウム合金および鋼材研究の中心におき、原子素過程をもとにトータルな材料性能(健全性・安全性)を評価するコードを開発している。その系統的なミクロからマクロに繋ぐ研究開発体制には学ぶべきものが多い。

またUCLAのGhoniem教授のもとでは、自己組織化過程の非線形反応速度論による解析について、プリゴジン学派との共同研究によって1985年頃から20年近くの成果が集約され近々に大部の教科書が出版され予定である。これは核融合材料の研究が中心ではあり軽水炉には適用されたことはないが、対象は類似であり数学的手法は確立されている。また、計算科学について同じくUCLAでキネティックモンテカルロ法を同種の自己組織化問題に適用する作業が進んでおり、本研究で採用する方針は国際的に見ても妥当な方向をもっていると考えられる。

一方、我が国では、上記とは独立にセラミックス燃料の高燃焼度化の研究から、生命系に類似した複雑系の研究が1990年代初頭の実験的かつ理論的にスタートした。実験的には8年間にわたる電中研主催の国際共研HBRP(HIGH BURNUP RIM PROJECT)にてセラミックス燃料の細粒化データが詳しく蓄積され、自己組織化過程のデータは十分存在する。平行して電中研にて照射欠陥の反応速度論的な不安定性の解析的な研究を始め形態形成の理論モデル構築を進めてきた。今後の残すところの課題は、基礎過程の同定と、計算機的ならびに実験的な再現である段階にある。これらのプロセスの解明が成功裏にすすめば、本研究の成果としてのシミュレーションコード開発が可能となると期待される。

## 9. 予定している研究交流体制(共同研究、国際的な研究者交流、設備や成果の相互利用、研究報告会の開催等)[注7]

米国(主としてUCLA、LLNL)、欧州(主としてフランスE d F、CEA-Cadarache、など)の主要メンバーを集めた国際的な会議を多数回開催し、これらの機関独自の研究計画との連携をもって、緊密な連携をもってすすめたい。UCLAと解析的手法の開発に於いて、また仏E d FおよびCadaracheとは計算科学的な解析において協力を進めたい。

とくに、これらの共同研究参加者にマイルストーンを明確に意識してもらうために、ロードマップを策定して適時に国際的な会議開催を企画し実現させたい。

#### 10. 予想される困難

発電炉の現場に於いて、シミュレーションコードの利用、ならびに自己修復機能等の材料挙動の観測を受け入れてもらうためには、そのコードの信頼性はもちろんのこと、特に現場実務とのきわめて良好な関係の構築が課題である。シミュレーションの有効性について、具体的に発電現場に於いて材料の管理制御への意識を変化させるくらい明確な成果を出すことができるか、大きな壁を前にしていると考え。しかしながら、非線形数学の適用は、エンジニアリング技術の将来に向けた大きな流れであり、実現すれば現場での、ホリスティック（総合的）な観測方法、制御方法が実現すると期待される。

シミュレーションモデルの開発においては、現象を明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。本計画のサブプログラムである計算科学と模擬実験によってその妥当性が検証できるかどうか、その総合的かつ強く連携した有機的な研究運営（プロジェクトマネジメント）が大きな課題であり、成功の鍵となると考えられる。

プロジェクトリーダー 氏名： 木下 幹康

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

電力の現場

材料挙動の制御

加速器模擬実験による  
自己組織化再現  
<<原研・九大>>

非線形数学的方法  
<<九大・北大>>  
(UCLA)

セラミクス燃料材  
細粒化現象  
のモデル開発

計算科学的方法  
による再現  
<<理科大>>



シミュレーションコード開発  
<<電中研・東大>>

## 原子力基盤クロスオーバー研究 研究構想

1. 課題名(プロジェクトリーダー 氏名)			
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)			
2. 構成機関及び研究担当者[注1]		[注2]	
機関名: 放射線医学総合研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 国立医薬品食品衛生研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 日本原子力研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 理化学研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 国立感染症研究所	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 近畿大学	所属:	担当者氏名:	担当:
機関名: 東北大学	所属:	担当者氏名:	担当:
3. 研究期間 平成16年 4月 ~ 平成21年 3月( 5年計画)			
4. 研究予算および研究者数			
	研究予算	研究者	
平成 16年度	120,000 千円	20 人年	
平成 17年度	( 予定) 120,000 千円	( 予定) 20 人年	
平成 18年度	( 予定) 120,000 千円	( 予定) 20 人年	
平成 19年度	( 予定) 120,000 千円	( 予定) 20 人年	
平成 20年度	( 予定) 120,000 千円	( 予定) 20 人年	
合計	( 予定) 600,000 千円	( 予定) 100 人年	
5. 研究目的・目標[注3]			
<p>16Gy以上の高線量放射線の生物影響については過去の多くの研究から概要が理解され、ヒトにおいては障害の治療法の開発まで進んでいる。しかしながら16Gy以下の放射線及び低線量率長期被曝の影響については必要性は強調されながらも、研究の推進が不十分であり、高線量域での生物効果を低線量域へ外挿してよいか、あるいは低線量で実質的閾値があるのかという素朴な疑問にも答えられない状況にある。そこで本研究では生体影響の指標を染色体、DNA、mRNAの変化にしぼり、低線量放射線による影響を定量的かつ多面的に解析し、その特性を明らかにしたい。具体的には、</p> <p>(1) 低線量率で長期曝露を行ったマウス等を用い、染色体異常、DNA突然変異、mRNAマイクロアレイ解析を行い、線量効果関係を明らかにする。</p> <p>(2) 適応応答及びバイスタンダー(bystander)効果の有無とその実体を解析し、低線量及び低線量率効果に特有なメカニズムを探る。</p> <p>(3) DNA損傷・修復のコンピュータモデル化により低線量放射線影響解析のin silico化を計る。</p> <p>(4) 化学物質と低線量放射線の複合効果の解析により、ヒトの実際の環境により近い系での影響評価を行う。</p> <p>これらの解析により、低線量域放射線の生体影響について理解を深め、社会に対しても説得力のある情報を発信するのが目的である。</p>			
6. 研究計画・研究内容[注4]			
<p>(1) 低線量長期曝露の影響については青森県環境科学技術研究所あるいは放医研、あるいは京都大学放射線生物研究センターの施設を借用し、自然放射線の数10倍、数100倍、数1000倍の線量をマウスに長期曝露させ、DNA上の突然変異頻度、染色体異常頻度、mRNAの変化をいくつかの臓器で解析する。mRNAについてはマイクロアレイ法を用いる。これらの研究により、低線量域での放射線影響が分子レベルでどのようなものか、また実質的閾値があるのかどうかについての基礎データが得られると考えている。この研究には放医研(染色体)、近畿大(突然変異)、東北大(マイクロアレイ)が主に関わる。</p> <p>(2) 適応応答については遺伝子の組換えが容易に検出できるように改変した培養細胞系を用い、放射線による組換え誘発に対し適応応答の有無を明らかにするとともにmRNAの変化を解析しそのメカニズムを探る(理研、放医研)。またバイスタンダー効果については、細胞内小器官を別々に照射できるように絞ったマイクロビーム線を開発し、それを用いて細胞内局所照射の細胞への影響並びにバイスタンダー効果の実体を明らかにする(原研・高崎)。</p> <p>(3) 放射線がどのようにDNAに損傷を生じるかをモンテカルロ法を用いてコンピュータ上でシミュレーションする。これまでに低LET放射線がDNA単体に照射された場合についてはかなり解析が進んでいるので、今後異なるLET放射線についての損傷の解析を進めること、さらに細胞内の条件に近似させるためクロマチン構造を作った時、並びにDNA修復酵素が働いた時の</p>			

## 6. 研究計画・研究内容（続き）

シミュレーションを行う（原研・東海）。またこのシミュレーションの信憑性を確かめるため実際のDNA、クロマチン、修復酵素、細胞を用いた結果と対比させてゆく（国立感染症研究所）。

- (4) マウス及び培養細胞を用い、タバコの成分である4-methylnitrosamino-1,3-pyridyl-1-butanone(NNK)による突然変異誘発が低線量放射線照射によりどのような影響を受けるかについて明らかにすると同時に、そのメカニズムについても解析し、放射線と化学物質の複合的な作用について明らかにする（国立医薬品食品衛生研究所）。

なお計画の最後に示した研究機関は研究に関与する主な機関を示したものであり、それぞれの研究者間で密接な連絡を取りながら研究の成果を高められるよう計画している。

## 7. 期待される成果・波及効果（原子力研究開発・科学技術全般への波及効果等）[注5]

本研究により、マウスの染色体異常、DNA突然変異、遺伝子発現変化を指標とした低線量域での線量効果関係が明らかにされ、かつそのメカニズムについても一定の理解が進むであろう。それに伴い、実質的閾値の有無についても結果が得られるであろう。またDNA損傷・修復のモデル化は放射線の生体影響をコンピュータで推測することを可能にする基礎として、さらに複合影響の解析はヒトの現実に近い複雑な環境下でのリスクの新しい評価法の基礎として、新しい研究に向けた挑戦の基盤研究となろう。

これらの結果はそれだけでヒトに対する低線量放射線影響を決める材料にはならないが、低線量放射線に対する漠然とした人々の不安に対し、科学的な観点から答えてゆく唯一の道であろう。このような研究の結果が、低線量放射線のリスクの実体を具体的に説明してゆく足がかりになると考える。

なお、年間数10mGyとか数100mGyの放射線は地球上の高バックグラウンド地域で実在する線量である。このような一種の外的ストレスが恒常的に存在する時に生体が何らかのストレス応答反応をしていることは十分に予測され得るし、もしその手掛かりがみつければ、環境と生命の関連性を理解する新しい知見となろう。

## 8. 関連研究の国内外の状況[注6]

低線量放射線の生物影響については欧米でもその重要性が認識されているが、多くの研究は高線量を用いたメカニズムの解析や細胞のモデル系を用いた解析であると理解している。そのような中で、最近青森県の環境科学技術研究所がマウスを用い、400日連続曝露で20mGy、400mGy、8000mGyのガンマ線を照射した時の寿命及び発癌率への影響を明らかにしたことは、モデル動物を用いて実質的閾値の存在を実証した研究として世界的にも多くの注目を集めている（論文投稿中）。この研究は自然放射線レベルの10倍から数100倍といった低いレベルの放射線の影響について実験的に証明することが可能であることを示している点でも大きなインパクトを与えている。今後、さまざまな生体指標を用いて低線量影響を明らかにしてゆく良いモデルになるであろう。

## 9. 予定している研究交流体制（共同研究、国際的な研究者交流、設備や成果の相互利用、研究報告会の開催等）[注7]

本研究に参加する研究者の多くは、過去に多くの共同研究、研究交流をしている実績があり、その基本姿勢は本研究でも引き継がれる。情報交換や共同研究推進、成果発表のため少なくとも年に2回のミーティングを計画している。またコンピュータモデル化については高線量域研究との連携が可能であり、開かれたプロジェクト推進を予定している。国際的な研究交流についても費用が許すのであれば是非活発に行い、研究の推進に役立てたい。

## 10. 予想される困難

本研究のひとつの柱としてマウスを低線量で長期曝露することを考えているが、これが出来るのは青森県の環境科学技術研究所（環境研）か放医研、放生研ぐらいである。7月19日時点で環境研に打診し基本的な承諾を得たが、マウスの匹数、照射開始時期等である程度の制限を余儀なくされる可能性はある。

低線量放射線の生物影響は、非照射群との差が見られなかった場合、検出限界以下だから差がみられないのか、もともと差が無いのかの判断が困難である。この点に関しては放射線に対する生体反応の基本的なメカニズムを参照して推測することとなる。

プロジェクトリーダー 氏名： 小野 哲也

# 低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析

