

新クロスオーバー研究の研究計画について（案）

別添 1：研究計画書

【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」

別添 2：研究計画書

【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」

(案)
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。

(案)
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からするとともに、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量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。

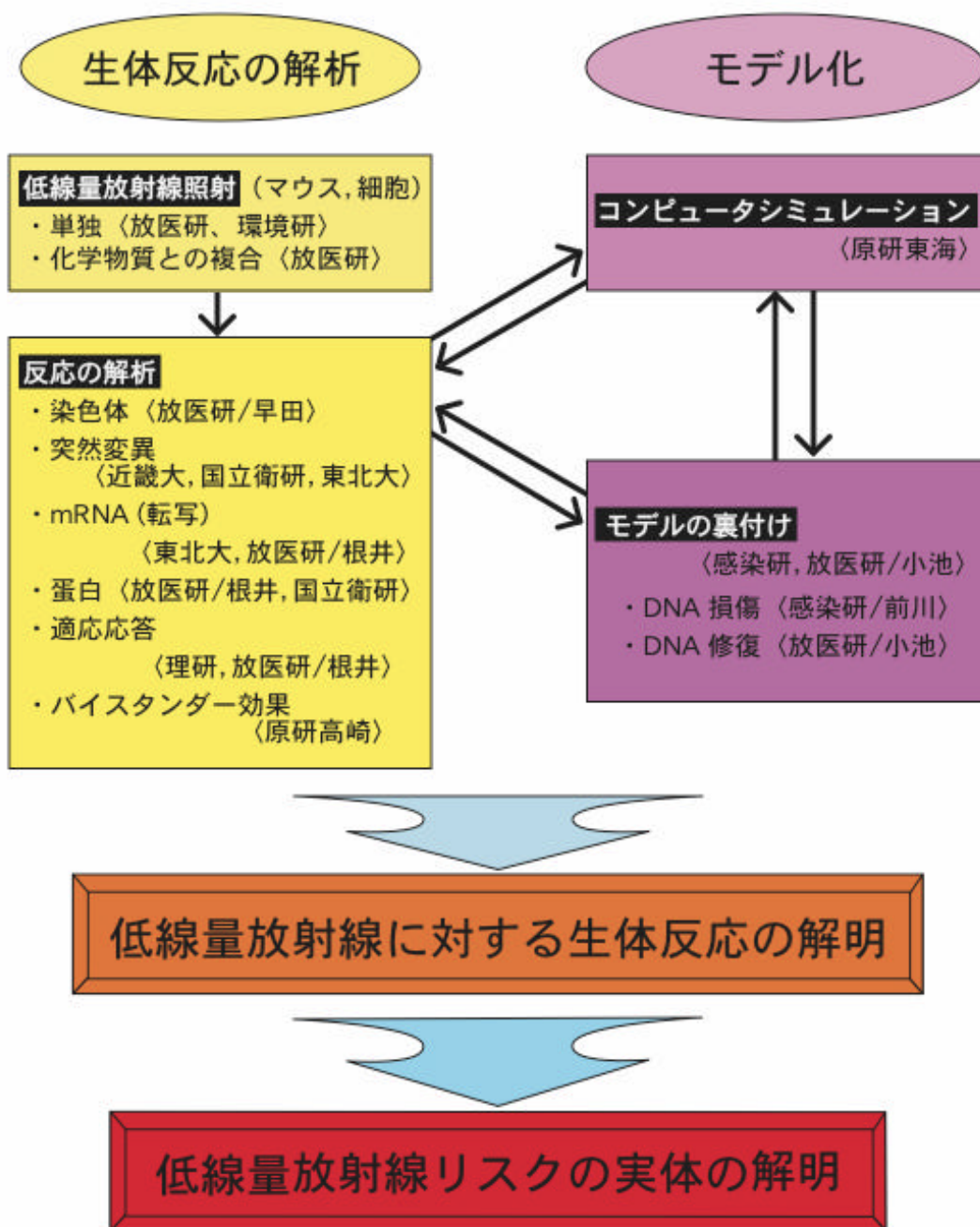
5．予想される困難と対処方針

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ないので、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。

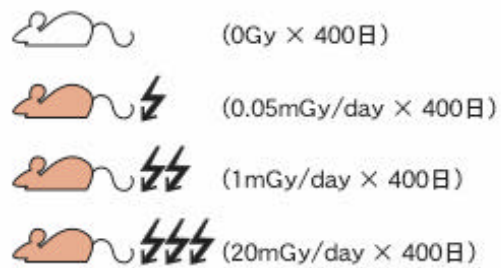
なお、研究の進展具合によっては、より良い方向性を確保するため、研究計画のある程度の変更も大胆に考えてゆきたい。むろんその時は研究評価ワーキンググループの承認を受けて行う。

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

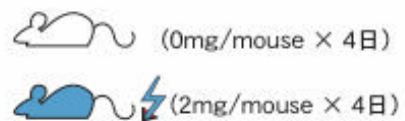


(2) 低線量放射線と化学物質の複合効果

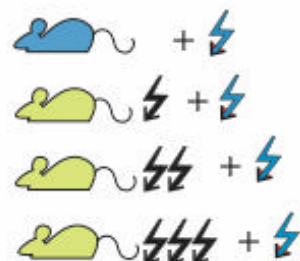
放射線



化学物質

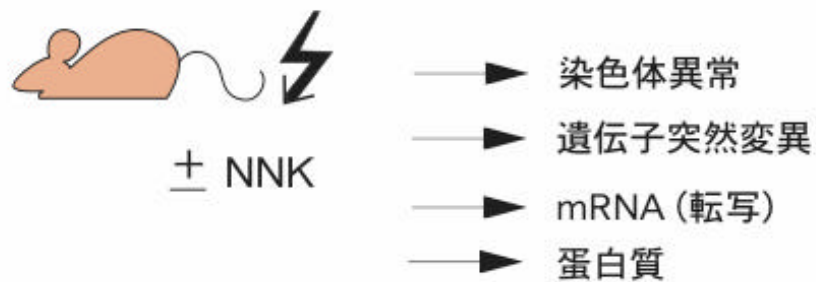


放射線と化学物質



生物の指標

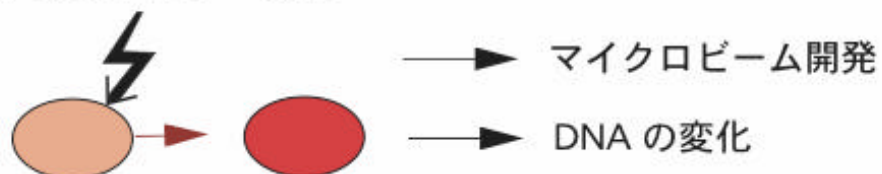
(1) 低線量放射線単独、化学物質との複合効果



(2) 適応応答

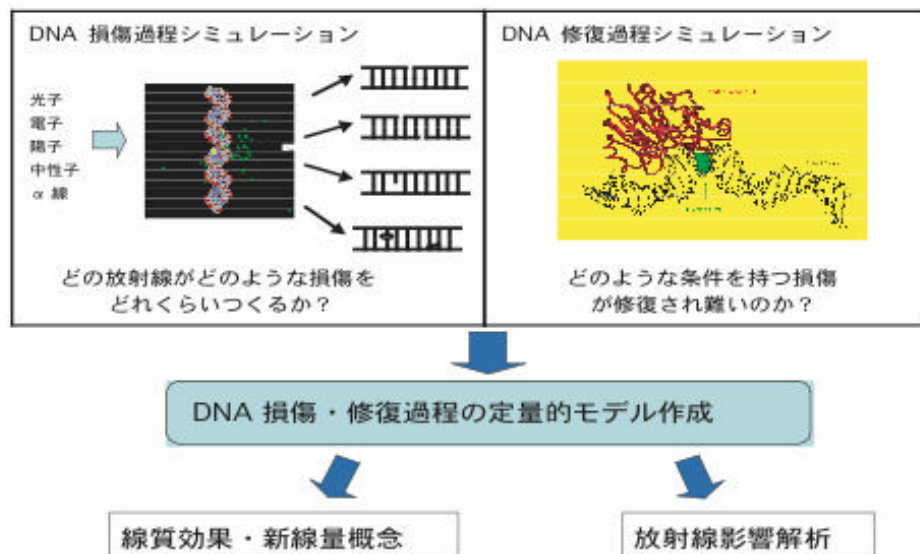


(3) バイスタンダー効果



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



(案)
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。このような形がつくられることは、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。

(案)
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 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ から約 $0.2 \mu\text{m}$ 程度に細粒化し、約 $1 \mu\text{m}$ 径の気泡が $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 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 $6.5 \sim 7.0 \text{ MWd/kgM}$ 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、ひんぱんな遠隔地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。

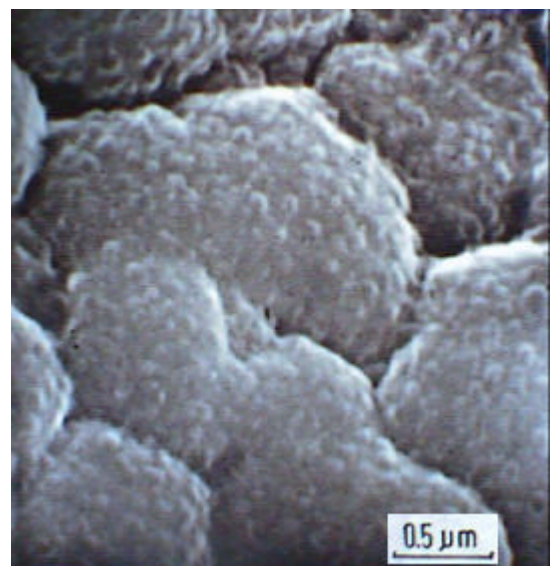
反応速度論方程式系の構築においては、本研究の範囲内では多くの速度論係数が不確定のまま残ると予想される。ここでは、実験と計算の組み合わせを良く工夫して、値のオーダー推定までは踏み込めるようにしたい。

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

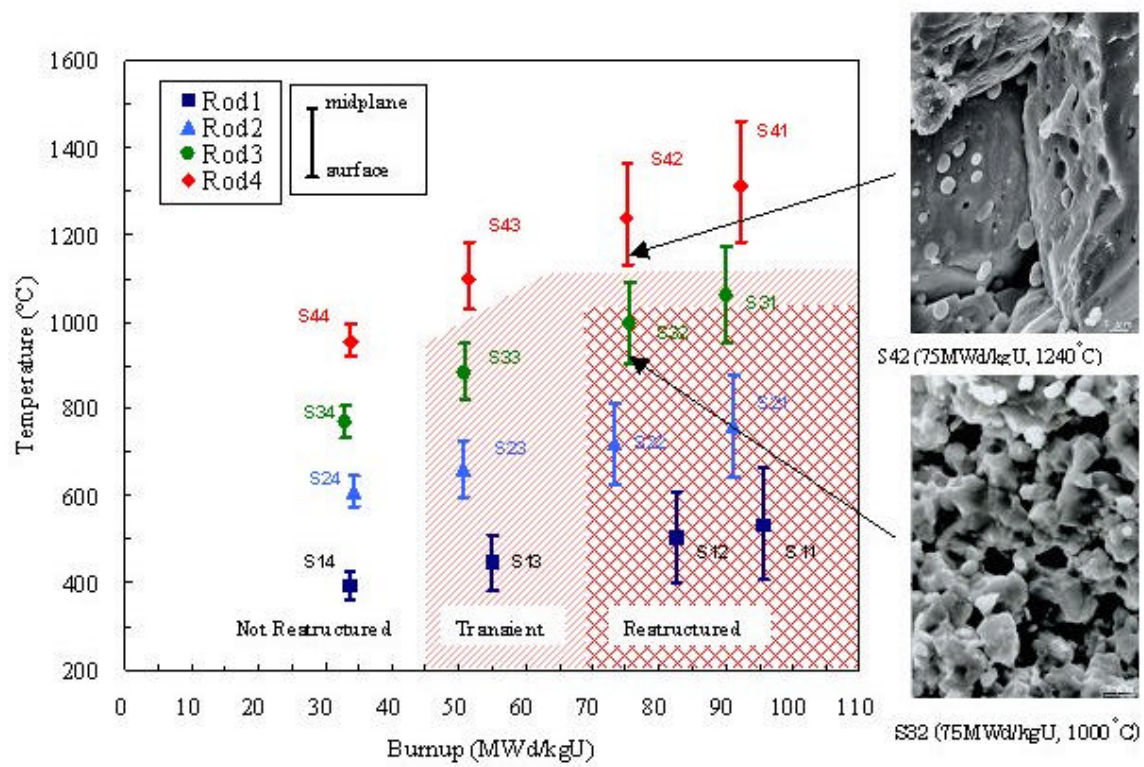


図2 . 細粒化・リム組織(カリフラワー構造)が生じる温度・燃焼度の領域

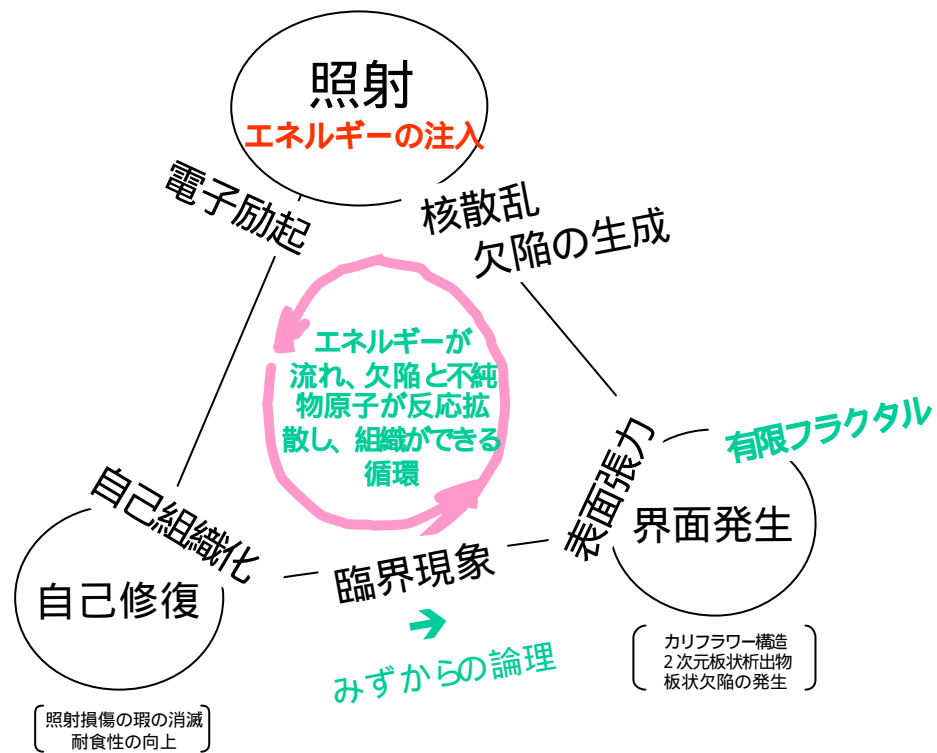
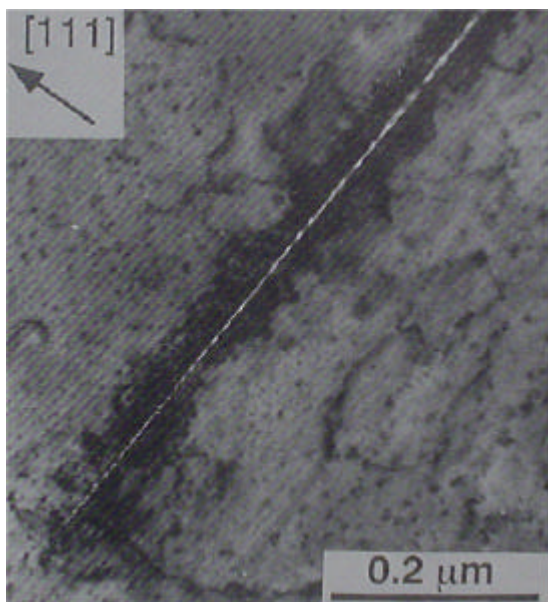
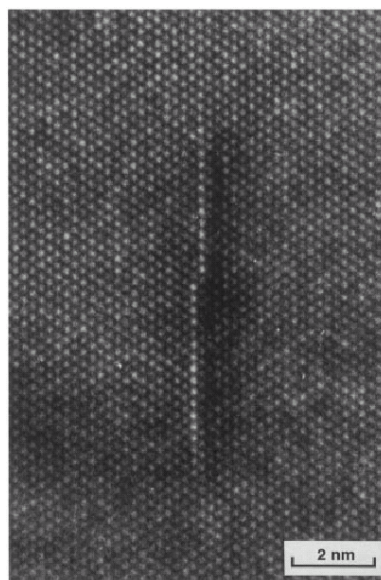


図 3 . 投入エネルギーと結晶欠陥の循環
によって界面（形態）が発生する



(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

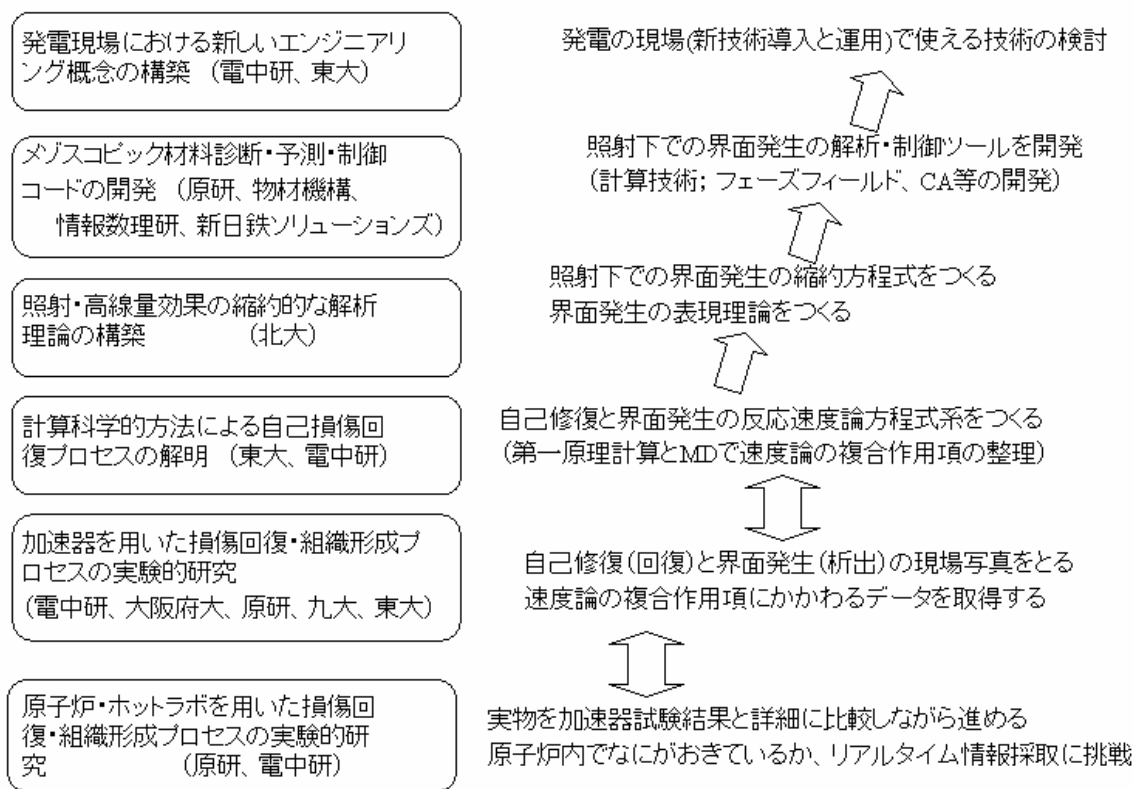


図 5 . 研究課題の相互関係と研究の流れ