

## 新クロスオーバー研究の事前評価結果について（案）

### 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（案）                    |
| 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<br>エンジニアリング」 |
| 参考 5 - 1 | 第 1 回クロスオーバー研究評価WG 議事概要                     |
| 参考 5 - 2 | 第 2 回クロスオーバー研究評価WG 議事概要                     |

## 新クロスオーバー研究に係る研究評価実施要領（案）

平成 年 月 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が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。

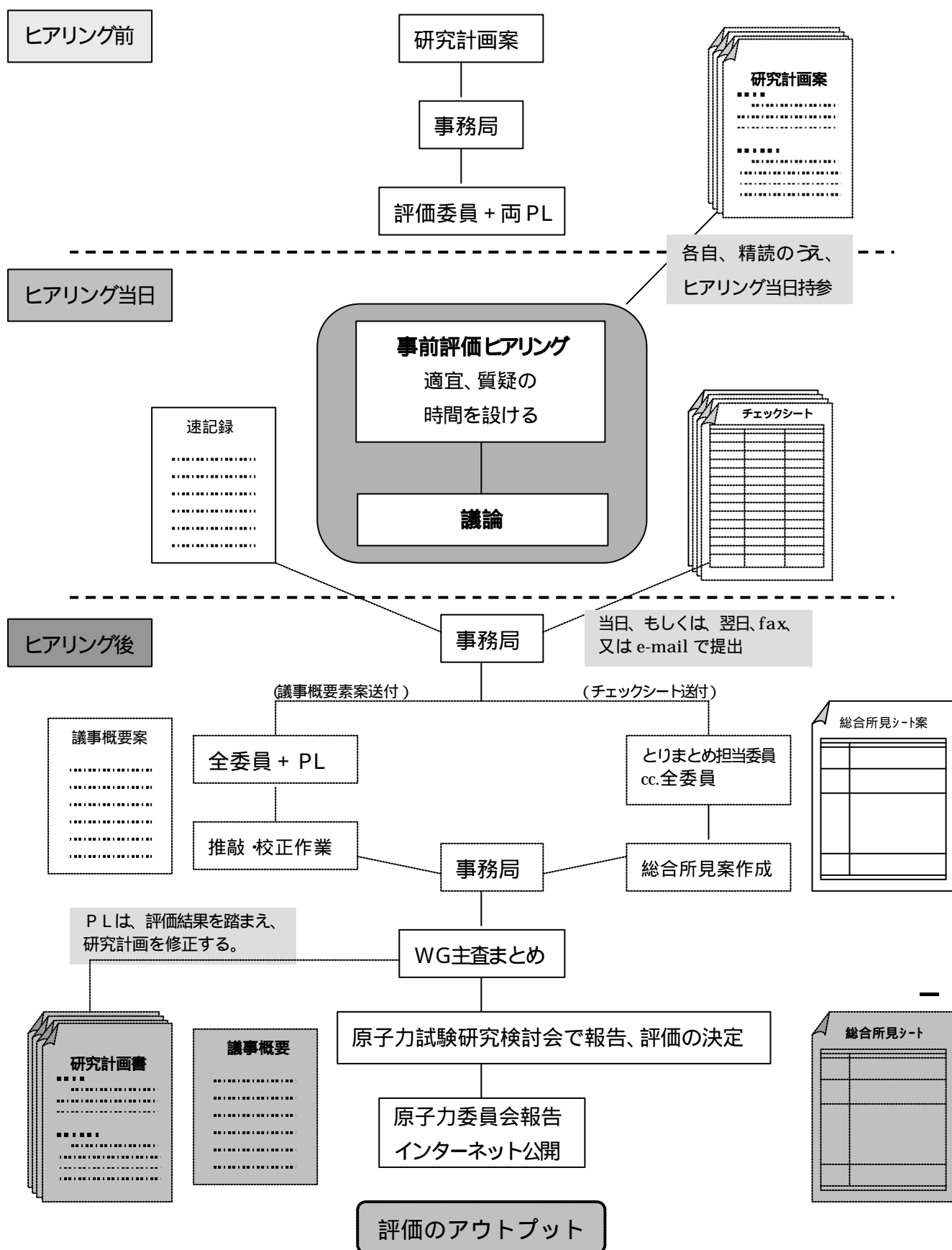


### クロスオーバー研究評価WG委員名簿

主 査	いわた しゅういち 岩田 修一	東京大学大学院工学系研究科教授
副主査	あべ かつのり 阿部 勝憲	東北大学大学院工学研究科教授
副主査	しま あきひろ 嶋 昭紘	東京大学名誉教授
委 員	きたがわ げんしろう 北川 源四郎	文部科学省統計数理研究所長
委 員	きたむら まさはる 北村 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 たつお 近藤 達男	東北大学大学院工学研究科客員教授
委 員	さかい かずお 酒井 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 はるくに 田中 治邦	東京電力 ( 株 ) 原子力計画部企画担当
委 員	ともなが まさお 朝長 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 おおつら 丹羽 太貫	京都大学放射線生物研究センター教授
委 員	みやけ ちえ 三宅 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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul> <p>[独創性・新規性]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
(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"> <li>・予算配分</li> </ul>	<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"> <li>・その他研究交流（国際的展開等）</li> </ul>	<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"> <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]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>[波及効果]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
<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>[相乗効果]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul> <p>[リーダーシップ]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul>
<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>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	
<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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	
<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(<math>UO_2</math>)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"> <li>・予算配分</li> </ul>	<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"> <li>・その他研究交流（国際的展開等）</li> </ul>	<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"> <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]</p> <p>照射・高線量のもとで、秩序ある組織がつくりだされる(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"> <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"> <li>・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。</li> <li>・広い領域の人材を適宜活用されたい。</li> <li>・現象の観測と数学的解析との対応・つなぎを常に心がけて進めてほしい。</li> </ul>	
<p>4．その他</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料<math>UO_2</math>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。</li> <li>・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。</li> </ul>	
<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>	

第 1 回 クロスオーバー研究評価WG  
議事概要

1 . 日 時 平成 1 6 年 2 月 5 日 ( 木 ) 1 2 : 0 0 ~ 1 4 : 0 0

2 . 場 所 文部科学省ビル 1 0 F 1 会議室

3 . 出席者

WG : 岩田修一 主査(東大)、嶋 昭紘 副主査(東大)、阿部勝憲 副主査(東北大)、  
北川源四郎 委員(統数研)、北村正晴 委員(東北大)、近藤達男 委員(東北大)、  
酒井一夫 委員(電中研)、田中治邦 委員(東電)、朝長万左男 委員(長崎大)、  
三宅千枝 委員(元阪大)

PL : 小野哲也(東北大)、木下幹康(電中研)

研究機関 : 早田 勇(放医研)、根井 充(放医研)、小池 学(放医研)、鳴海一成(原研)、  
斎藤公明(原研)、増村健一(衛生研)、藤本浩文(感染研)、谷田貝文夫(理研)

文科省 : 石井利和 量子放射線研究課長、庄崎末果 量子放射線研究課長補佐

4 . 議 題

- ( 1 ) 開会、主査挨拶、配布資料確認、事務局説明等
- ( 2 ) 事前評価ヒアリング「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」
- ( 3 ) 議論 ( 自由討論 )
- ( 4 ) 主査総括、事務連絡、その他、閉会

5 . 議事概要

( 1 ) 開会挨拶、主査、副主査の選任

石井課長による開会挨拶に引続き、本WGの主査を岩田先生に、また、副主査を研究テーマのとりまとめ等を含め、阿部先生、嶋先生の両先生にお願いしたい旨が伝えられ了承された。

( 2 ) 主査挨拶

岩田主査から、今回の新クロスオーバー研究のテーマは極めて挑戦的な内容を含んでおり、委員の皆様から忌憚のないご意見、アドバイスをお願いしたい旨が伝えられた。

( 3 ) 委員紹介

石井課長から、委員の紹介が行われた。

( 4 ) 配布資料の確認

庄崎補佐から配布資料の確認が行われた。

( 5 ) 評価のポイント及び評価の進め方に関する説明

庄崎補佐から配布資料に基づき、評価のポイント及び評価の進め方について、説明が行われた。

事務局からの説明に引続き、岩田主査から今回のクロスオーバー研究については、既にそれぞれの科学技術分野で確立した部分を人工知能等IT分野の成果を使って計算機を用いて検証するのではなく、むしろまだ見えてない部分、わかってない部分について、我々の今まで科学技術分野で培ってきた方法論あるいは知見に基づいてどこまで外挿できるか、それができないとしたらどのような対策が考えられるかという、極めて挑戦的な内容を含んでおり、本研究を通して、是非日本発の科学技術の成果を発信いたしたく、先生方のご意見を将来に向かっての实りのある議論としてできる限り公開したい旨があわせて伝えられた。

(6) 事前評価ヒアリング「低線量域放射線に特有な生体反応の多面的解析」

事務局からのヒアリング方法の確認に引続き、小野プロジェクトリーダーからプロジェクトーを用いて、研究計画案の説明がなされた。

ヒアリングは約1時間に亘って行われ、大きく、〈総論〉と〈各論〉に分けて実施された。〈総論〉に関する主な質疑は、以下のとおり。

(朝長) 化学物質と放射線の複合効果を見るために、その化学物質だけの効果というのを見る必要はないのか。

[小野] 全然処理しないもの、化学物質の処理をしたもの、放射線を処理したもの、それから化学物質と放射線を処理したものという4つをペアにして実施する予定である。

(近藤) 「低線量放射線照射(実験)」に対してのフィードバックの矢印はないようだが、方法論的なことを研究されるのであれば、そちらにもバックする矢印が考えられるのでは。

[小野] 放射線単独の照射だけで、400日間の照射を考えており、それだけで大方1年半、その前後を加えると2年近くを要する。よって、2回目の照射を行うということは考えていなかった。ただ、感染等の事故により、途中で失敗する可能性もあり、実験がうまくいかなくなったときには急きょもう1回始めないとならないわけで、そのときには2回の実験を行う必要がある。実際に本研究期間中に再度の照射が行えるかどうかは別にして、理想的には、委員のご指摘のとおり、照射のスケール等、もう一度最適な照射方法等にフィードバックするということは考えるべきであろうと思われる。

(北川) 化学物質と放射線の複合効果について。ねらいとしては、2つの効果を分離するという立場か。それとも相乗効果等を含めた検討という立場か。

[小野] 本実験では、タバコに実際に含まれている化学物質を考えており、最初の着想としては、実際にタバコを吸いながら放射線を受けたらどうなるだろうというもの。よって、実際にどういう結果になるのかということについては、具体的なイメージは持っていない。

ただ、ターゲットについては基本的にDNAということで同じであり、例えばDNAに傷をつけて、それが突然変異になってということで説明できればと考えている。実



際には両方とも、DNAだけでなく、mRNAや蛋白の変化も含めオールラウンドでアプローチしていく予定である。

(朝長) 発がんの最後の段階では、化学発がんと放射線発がんを比べると、放射線発がんは普通に一般の集団が起こすがんと全く同じものが出てくる。一方、化学発がんは生体内残留性等の関係で少し特殊なものが出てくると言われているが、厳密な差というのは、出来上がったがんにおいては余りないという理解か。細胞等のシグナルで差があるなどの問題はないのか。

[小野] 一部の反応においては、差があるかもしれないが、それがクリティカルな問題とはならないと考えている。

(三宅) 化学物質に関連し、活性酸素とか活性水素はそのメカニズムを考える途中で出てくるのではないかと。それらは安定なものとして取り出すことはできないと思われるが、放射線には必ずついてまわるもの。その活性酸素などの取り扱いは。

[小野] 放射線の場合にはもちろん活性酸素がかなり関与してくるわけであるが、化学物質の場合にはそれがどのくらいかということは、把握していない。

(嶋) 低線量、あるいは、低線量域放射線ということに対する一般の、この場でのコンセンサスとして、バックグラウンドの10倍程度までということ、大前提の目安として、プロジェクトを進めるという理解でよろしいか。

[小野] 生物学的な指標によってどこまでいくかというのはかなり難しい問題であり、もしかするとその最低のところまで全部がいけるかについては、やってみないことにはわからないところもある。ただ、プロジェクトのメインのストリームとしては、そこを前提にしたいと考えている。

引続き、小野プロジェクトリーダーからプロジェクターを用いて、〈各論〉の説明が行われた。最初に、「低線量放射線影響に関する研究」「化学物質との複合効果に関する研究」についての説明が行われた。

主な質疑は、以下のとおり。

(岩田) 先ほど北川委員のご質問にもあったが、ディターミニスティックに決まる部分とシナジスティックなところでどこまで明らかにできるかということについて教えていただきたい。それには、データ量とかデータの質によるものと思うが、その辺りについてはどのくらい議論されているのか。

[早田] 化学物質単独で、もう明らかに異常が出るという量はわかっており、データに基づき適切な量を与える。一方、染色体の方では、人間のものでは解析できるレベルである

が、マウスを使ったときには解析できるかどうかわからないレベルである。この実験で一番大切なのは、いろいろな突然変異とかDNAの変化というさまざまなファクターと、染色体異常とを比較しながら同じマウスについて解析していくというところにある。したがって、あるものは解析できるかもしれないけれども、あるものは解析できないと、そういうような結果が予測されている。

[ 小野 ] できる限り、シナジスティックな効果があるかないかということは結論が出せるようにしたいと考えている。

( 岩田 ) 仮に、今回のデータのみで決定できないようであっても、新たにこういう実験が必要だというような提案できれば、それなりに意味がある。是非その辺りは明確にして発信していただきたい。

[ 小野 ] これだけのスケールで、こういうことをやって、こういうデータで出た。それに基づき、「これは言える」とか、「これは言えない」ということが、きちんと結論が出せるようにしたいと思う。

( 朝長 ) 早田先生に教えていただきたい。リンパ球の染色体異常というのはT細胞を見るという理解でよろしいか。

[ 早田 ] そうです。マウスの場合と人間の場合における解析の難易度の差が一番問題であり、スライドにもお示ししたとおり、人間の場合だとリンパ球は細胞分裂に入っていないので、染色体異常が放射線によるものか、化学物質によるかというのは区別ができるが、マウスのときにそれができるかどうかはまだ何とも言えない。

( 朝長 ) 基礎実験が必要ということか。それから、ここにはステムセルは入っていないがリンパ球そのものに起こった染色体異常と解釈できるのか。

[ 早田 ] 長期照射の場合にはステムセルの方にも起こったものを見ることになる。すなわち、転座型の異常を見ると、ステムセルの異常も入ってくる。ダイセントリックのような不安定型の異常を見ると、そのステムセルの異常は入ってこない。よって両方見ることになる。

引続き、小野プロジェクトリーダーからプロジェクターを用いて、「修飾要因に関する研究」についての説明が行われた。

主な質疑は、以下のとおり。

( 朝長 ) バイスタンダー効果の研究に関し、放射線の種類はどのようなものを使いながら開発されているのか。X線なのか。

[ 鳴海 ] 本計画では、カーボン、アルゴン、それからネオンといった重粒子線を用いる予定である。

[ 谷田貝 ] 私の方で担当する適応応答については、低線量X線による適応応答を本格的なX線照射による変異誘発を指標にして調べることを考えている。また、後半の年次に入ったら、ケミカルや紫外線などによる本格的な処理を行うが、始めの低線量についてはX線で進めたいと考えている。

引続き、小野プロジェクトリーダーからプロジェクターを用いて、「影響のモデル化に関する研究」についての説明が行われた。

主な質疑は、以下のとおり。

( 阿部 ) 全体を通しての質問。放射線と言う場合に、特に低線量であるとその放射線の線質に非常に依存するように直感的に感じている。先ほど最後にシミュレーションのところでいろいろな放射線の線質に関する説明があったが、実験的にはそれぞれ、この実験ではこういう線質というように、使い分けしているような感じを受けた。

1つの現象に対して、例えばいろいろな放射線の特徴というか、波長とかエネルギーの違い等があり、その辺りについて、どのように考えているか。

[ 小野 ] 最終的にはもちろん、いろいろな質の放射線に対する影響を全部理解できるようにしなくてはならないと考えているが、少なくとも今の段階では、ほとんど大方のデータはX線、 $\gamma$ 線等のlow LETの放射線に依存している。最近、ようやくhigh LETの放射線も実際に使われるようになってきており、それが実際にlow LETのものと、どのくらい違うのかというデータが出始めているところ。しかしながら、まだそれほどきちんとしたものではないと私は理解している。

ただ、実験によっては、先ほどご説明したバースタンダー効果の研究のように、細胞1個に狙って放射線を当てるということになる、理屈では、X線を絞っても構わないわけであるが、多分、技術的に重粒子線の方が絞りやすいため、まずそれでやってみて、そちらの影響を見る。イニシャルなダメージの様子が違うということはあるかと思うが、大きな流れの中ではlow LETでもhigh LETでも放射線の線質が違うことによって、それほど違いはないと考えている。但し、委員の言われるように、将来的にはきちんとそれぞれの放射線の線質に対して回答を求めていかないとはいえないと考えている。

[ 谷田貝 ] 今の話に関連して。特に適応応答とかバースタンダー効果の研究のように、1つ1つの細胞に放射線を当てるときには、粒子放射線の場合と、X線の場合とがある。X線で絞った場合と粒子線で絞った場合とで、どう違うのかということについて、イギリスのグループでケビンブライスという人たちが中心になって研究が進められているが、まだ初期段階の研究であるものの、両者の間で大きな差は出てきていない模様である。したがって、粒子線の方でいろいろな研究を進めていければ、基本的なところ

の理解につながっていくのではないかと考えている。

また、日本の国内でもX線の方の開発も順を追って進められており、将来的には、X線のマイクロビームの研究ともリンクしていける可能性もあると考えている。

[ 斎藤 ] low LETとhigh LETに関しては、実はやはりかなり違うのではないかと  
いう認識がある。放射線荷重係数とか、線質係数を見ると、例えば 線だと20であり、  
線に比べると20倍も危険であるとの認識に基づき設定されている。したがって、や  
はり基本的には違うのではないかとと思われる。その辺りも、今後きちっと研究してい  
く必要があると考えている。

( 嶋 ) リアルタイムPCRを使った解析で、最小切断誘発線量という表記があるが、その線  
量の大体オーダーはどのくらいか。

[ 藤本 ] 20から30グレイである。

[ 小野 ] このサブテーマでは、低線量の影響を調べるというよりは、メカニズムをモデル化し  
ようというものである。実際には細胞の中に非常に長いギガベースのDNAがあって、  
そこに低線量が当たったら1個とか2個とかに損傷が発生するわけである。ここでの  
モデル化においては、その1個を強制的に起こさせて、それがどういうふうに起こり、  
どういうふうに修復されるかということを解析するものであり、ここでは低線量であ  
る必要はないと考えている。逆に、短いDNAをもってきた場合、ダメージ1個起こ  
すためにも大量の放射線をかける必要があるわけで、完全にメカニズムの解明の方に  
主眼があるのご理解いただきたい。

[ 斎藤 ] リアルタイムPCRを使った解析は、基本的にシミュレーションモデルの検証用の実  
験という位置づけである。したがって、この実験で直接に低線量で起こっていること  
を明らかにしようということではなくて、私どもで担当するシミュレーションがきち  
んで行われているかどうかということと、非常にクリアな条件で実験し比較を行うこ  
とにより、検証を行うことに主眼がある。そのうえで、本研究では、検証された計算  
モデルを用いて低線量について調べていこうというものである。これまでに行った予  
備的な実験においては、シミュレーションの結果とよく合っている結果が出ている。

[ 早田 ] 放射線量というのはDNAが長ければ長いほど、例えば1万メートルのラインの上に  
1個の切断を起こすのと、10センチのラインに1個の切断を起こすのとずいぶん必要  
量が違う。ここで使っているDNAは、人間の染色体にすると数十万分の1の長さし  
かないわけである。したがって、実際には非常に短いものに当てているわけであり、  
1切断を起こすだけでも高線量が必要で、そのために線量が高くなっている。

( 酒井 ) 今、議論になっている線量の話に関連し、最初にご説明にもあったとおり、低線量で  
も特に低い線量においては、とてもその影響が見えないということが出てくる可能性

がある。そうすると、全体の流れの中で、ある現象にはこういう線量を使うけれども、その現象の解明が個体レベルでの低線量の影響にどう反映するかというような形でストーリーをつくっていただくとわかりやすいのではないかという感じがした。

それからもう1つ。一番最初のところで、リスク評価という話が出ているが、具体的にはどういう指標を想定されているのか教えていただきたい。

[ 小野 ] 例えば作業従事者の許容線量という数字があるわけであるが、それは大した根拠があって決められているわけではない。けれども、例えば、実際にはバックグラウンドの10倍レベルでは何を見ても、影響が見えませんよ、ないしは、何かは見えますよというようなことが出てくるのではないかと思われる。原則的なところではあるが、例えば染色体異常は見えるか見えないかとか、そういう証拠を出しておくことが、今後のリスク評価につながっていくものと考えている。

( 北川 ) シミュレーションのモデル評価というのは極めて重要だと思うが、実際にその検証については、どのように行うのか。

[ 斎藤 ] 本研究では、DNAの「損傷」と「修復」という2種類のシミュレーションを行うこととしているが、「損傷」に関するシミュレーションについては、その損傷過程の各段階において検証する手段がいろいろと考えられる。例えば電子線を飛ばして、個々のエネルギー付与をずっと追っていき、最終的に電子がどれぐらいの距離飛ぶかという、電子の飛程などについてはシミュレーションの結果と実験データがかなりよく合っている。

それから、その次の段階として起きてくる、ラジカルができて、それが拡散して化学反応を起こし、時間的に変化していく様子をシミュレーションしていくことに関しても、部分的にはラジカル収率の時間変化を観測した実験データがあり、これと同じ条件で計算してみると、ラジカル収率の時間変化についてもある程度きちんと追えている。

それから、プラスミドDNAにおいて鎖切断がどのくらいの確率で起きるかというデータがあり、これとの比較においても、非常にきちっと条件を決めた場合にはやはり鎖切断の収率をきちんと再現できるということで、各段階において、それぞれ検証が行えるわけである。

一方、「修復」に関するシミュレーションについては、DNAに損傷ができた場合に、そこに修復酵素がどのようにくっつき、どういう場合にうまく損傷の修復が開始されるかというシミュレーションになるわけであるが、こちらの方はなかなか直接に実験との比較ができない。現在、唯一検証できるのは、損傷ができた場合のDNA形状の変化をX線構造解析のデータと比較にすることにより、形状等が一致しているかということを、スナップショット的に検証できる程度である。

( 北川 ) それで、例えば2つモデルがあったときに、どちらがいいかという判定ができるのか。あるいは、合っているといったときに、要するに数字が少なくなっていて、非常に分

布等、難しいかと思われるが、その辺りの確率的な構造まである程度考えた形でシミュレーションを行えるのか。

[ 斎藤 ] 最初の方のシミュレーションはモンテカルロ法であり、素過程の生起確率に関するいろいろな条件、分布を持たせた形でシミュレーションができる。したがって、出てくる結果についてもある程度確率的なもの、例えば電子の飛跡などは当然毎回違うものが出てくるが、そういう意味では分布をもった結果が得られるわけである。

( 北村 ) 今、北川委員が言われたことに関連して。実験が簡単でないからシミュレーションで何とか頑張ろうとするわけであり、その検証については、どのポイントで、何に基づいて判定するかはいろいろと考え方がありと思われる。したがって、それをできれば事前に明らかにしていただいて、これについてはこの辺りまで確かめるということをやはり宣言していただくことが大事だと思われる。

特に、既にある現象を再現しただけでは、そのシミュレーションが正当性を持っているとは私は考えておらず、たまたま合うことはいくらでもあるわけであり、やはり最終的には、せめて予測に少しでも使えたら、それは大いに自信持っていただき、後から実験結果がついてくれば、それはいいモデルだと多分だれもが認めてくれるはずである。それがいつでもできるわけではなく、大変難しいことであることは重々承知しているが。

それから、もう1点。研究計画の書き方でお願いしたいのだが、評価というのが私どものメインテーマである以上、評価可能な、すなわち、評価というのは皆さんがある意味で客観的にそれになるほどと押さえられるような書き方にさせていただく必要があるかと思われる。例えば、手法を頑張って確立するとか、コードを構築するとか、という言い方だけだと、その判定が難しく、どこまでいったら、自分は合格点をもらえるんだというご自身のスタンダードがあるだろうと思われるので、それが見える形で書いていただければありがたいと思う。

非常に明快な例としては、前川先生に書いていただいたもの。「差がでるか否か検討する」とか、「ある現象を再現し検出できるかどうか調べると」。あるいは「ニックが1箇所入る線量を算定する」など、極めて明快に書いていただいている。非常に大変だとは思いますが、ご自身のそれぞれのクライテリアを書いていただいて、それを明示した形にして見せていただけると、お互いに誤解ない形で評価ができるものと思う次第。

( 北川 ) 予想される困難というところに 400日間の連続照射のことが書かれているが、そもそもこれはどのくらいの個体数を照射することを想定しておられるのか。

[ 小野 ] 80～100匹ぐらいを考えている。

( 北川 ) それで、途中で死んでしまったりした場合はどうされるのか。

[ 小野 ] 普通に死ぬのは、おそらく数匹であり、それは一応考慮の内であるが、懸念されるのは、マウスの飼育条件として特定の感染源に関してはフリーということになっており、その特定の感染源が入ることがあるわけである。そのときには実験そのものをやめて、100匹のネズミを全て捨てて、そのうえで中を無菌にしてもう一回改めて 100匹入れないといけないということになる。

( 北川 ) 非常に素朴な疑問であるが、何故400日にこだわる必要があるのか。要するに、400というのはたまたま使ったものであって、そこだけがターゲットなわけではないはず。そうすると、例えば 300日でも情報は持っているわけであり、そこで調査してもよいのではないか。

それからもう1つ。どこの線量で出てくるかというのを調べるのであれば、4つの条件で何十ずつやるよりはばらした方がよいのではないか。

[ 小野 ] 何故 400日かということについては、( 財 ) 環境科学技術研究所の方で、その日数の照射により、寿命と発がん率に対しては調べているということがある。ただ、それは表現型であり、それをバックアップするという意味もあって400日という設定をしているが、やはり分子レベルでメカニズムの解明を行う必要があると考えている。それから、多分、マウスでの実験データが出てくると、今度はその結果を人に外挿できるのかという話になると思われる。その際、マウスとヒトでの分子機構というのは、今、猛烈にわかりつつあるので、分子レベルにおけるメカニズムにおいてそれを説明するのが唯一の方法になろうと思われる。もちろん、一方では疫学があるが、ただ疫学はもうこれ以上データが出てこないということがある。

( 北川 ) 職業人とか、高バックグラウンド地域があると書いてあったが、そこからデータが取れるのでは。

[ 小野 ] それは疫学の方で行っていただきたいと考えている。確かに、染色体異常のデータも集められてはいるが、それはあくまで疫学のデータであるし、数も限られるうえ、人の場合にはいろいろなファクターが入ってくる。本研究では、実験的なアプローチのデータとして、マウスを考えているわけである。

( 嶋 ) 今の北川委員のご質問と関係して。まず線量率としては3つ、これをデフィニティブに選ばれ、そして、途中で調べたいなという気持ちを押さえながら400日間ずっと待つということになるのか。

[ 小野 ] 実際問題としては、測定方法の問題とか急照射で1回やったものと必ず比較しなくてはならないと考えており、例えば一番高いのは 4,000倍でトータル 8 グレイになるわけであるが、8 グレイを一発でボンと当てた場合はどうかというのを必ず押さえておく必要があり、400日間ただ待っているというわけではない。

( 嶋 ) それから、少し一般的な質問になるが、このテーマというのは低線量放射線の生体影響ということで、ある意味で非常に古くて、なおかつ新しいテーマであり、例えば放医研のような機関においてはミッションオリエンテッドサブジェクトであり、なおかつ多分現在も進んでいる、オンゴーイングのプロジェクトがあるとも理解している。したがって、どこからどこまでという非常にシャープラインを引くということは不可能に近いと私は考えているが、そういうオンゴーイングの既存のプロジェクトとこの新クロスオーバーのプロジェクトの仕分けということは、十分念頭に置かれているのか。

[ 小野 ] 多分バイオロジカルな現象というものは、極めて多様性が高いわけであり、それを日本全体の一つの大きなプロジェクトとして何千億とかいう巨費を投じて実施するというのであれば、それに越したことはないと思われる。しかしながら、現実にはそうはいかず、放医研でもあるプロジェクトが進んでおり、それから六ヶ所の(財)環境科学技術研究所では別のプロジェクトが実施されるというように、それぞれに違う指標と資金に基づいて研究が実施されているわけである。そういうものが幾つか並立して、なるべく総力体制でいけば、よりきちんとわかるのではないかと私は考えている。

[ 早田 ] 放医研で行う場合には、単独の研究機関であり、やはり実験の規模に限界がある。また、スコープとしても、放医研における低線量域の研究における最低レベルの線量というのは、本クロスオーバー研究の約10倍ぐらい上である。やはり放射線のレベルが下がれば下がるほど、大規模な研究が必要となってくることから、多機関が一緒に実施するクロスオーバー研究でないとこの挑戦的なレベルまでは、実施できないと考えている。

#### ( 7 ) 議論

岩田主査から、質疑の内容がすでに研究内容の全般に関する領域に入ってきており、これよりさきは、両プロジェクトリーダー、それから各連携機関の代表者にも積極的に参画いただいて、30分間の自由討論に移る旨、発言があった。

[ 早田 ] 北村委員がご指摘のあった「評価しやすい書き方」について、10頁の染色体の部分についてはいかがか。

( 北村 ) この部分についても、そのように書かれていると認識している。形成頻度の比較というところまで書き込んでいただいております、大変明快であると思っている。

( 嶋 ) 先ほど、リスク評価という言葉が出ていたが、現在の放射線規制の基礎になっているものの1つに、D D R E Fといわれる線量・線量率効果というものがある。D D R E Fというのは専門用語であり、低い線量あるいは低い線量率で何が起きているかということを理解するために、そのダイレクトなデータがない場合、高線量、高線量率で起きている出来事をいわゆる外挿して推測する係数、それがD D R E F ( Dose



and Dose-Rate Effectiveness Factor)、と言われるものである。例えば発がんということに関しては、現在DDREFは2である。一方、遺伝的影響、ことにこれは雄マウスの精原細胞と言われる生殖細胞に起こる突然変異の研究から得られた遺伝的影響に関するDDREFというのは、今、3であると理解している。ただ、これには非常に大きな不確かさを含んでおり、そういう不確かさに対して、今回行われるこのプロジェクトがどういう形でそれに貢献できるか。どなたかのプロジェクトで線量率として、ご説明にあった3つの線量率を選ばれるわけであり、ある意味での線量率効果が出せる可能性があるのか。

例えば六ヶ所村で行われた今までのデータで線量率効果DDREFが、発がん率に関しては幾つとかそういうデータは出ているのかどうかについて、ご存知であれば教えていただきたい。

[ 小野 ] 発がん率は、今、解析が進んでいるところであると理解しているが、六ヶ所でやっているのは線量率を変えているので、それぞれの線量率効果というのは計算すれば出てくるはず。

全部の生物学的な指標に関して、端的に言えば、1回照射のものと、それから線量率を変えたものに関してその生物指標が全部出てくれば、あとは単純な計算であり、それぞれの生物指標についてDDREFを出すことは原則可能であると思われる。我々のプロジェクトでも、それを極力出せるようにしてゆきたい。

( 酒井 ) 環境研のデータからは、DDREFは算出できない。理由は、400日照射の間、線量率を変えており、実験群ごとにトータルの線量が違うためである。線量率効果を見るためにはトータルの線量として同じ線量を設定して、そこに異なった線量率で当てることが必要である。

先ほどのお答えの中にも、急照射と長期照射というお話があったことと思う。ここで書いている計画では、400日を設定しておられるので、トータルの線量が変わってくるわけがある。したがって、もう一方で、線量を固定して、線量率を変えるという項目を1つ入れていただくと、今のご指摘に答えられるデータセットができるかと思われる。

[ 斎藤 ] 多分、マウスに関しては、今までにDDREFについてのデータを出されている大学の先生がおられ、臓器によって非常にDDREFにばらつきがあるという結果であったと理解している。したがって、それがどういう原因によるかについては、やはりメカニズムから探っていくとわからないのではないかと考えている。

( 酒井 ) 今のお話は、阪大の野村大成先生がなさっていると研究と思われるが、がんの種類によって2から数十までばらつきがあるという報告がなされている。したがって、さまざまなことを検討できるのであれば、それぞれの指標によって、あるいはがんの種類によってそれぞれどうか。つまり、DDREFと一くくりにできるかどうか、こういう指標の場合はこうだという情報まで出せるのではないかという感じがした。

[ 早田 ] 一番きちんと D D R E F が出そうなのは染色体異常である。ただ、染色体異常の場合に、先ほど申し上げたとおり、人間の細胞とマウスの細胞というのがかなり大きく異なっており、一番最初に朝長委員からご指摘があったとおり、マウスの場合は本当に T 細胞だけが反応してくるかどうかもよくわからないところがある。したがって、染色体の方の研究に関していえば、最初の 2 年間にきちんとその辺りの基礎的な研究を行い、それができたら、今、酒井委員からご指摘があったように、線量率を変えて、同じ線量で比較するという実験もやってみたいと思う。

( 北川 ) 酒井委員のお話に関連して。線量率と時間をパラメータとするモデルを入れれば、トータルを一定にしなくても解析ができるのではないかな。

( 酒井 ) 確かにそういうモデルを構築なさっている方もおられるが、今現在、例えばさまざまな場面での防護基準というのがトータルの線量で設定されているわけである。

D D R E F の概念というのは、先ほどお話にもあった放射線のリスクに、時間のファクターを入れる。すなわち、その設定された線量がどれほどの時間をかけて与えられたときにどうかというものである。

そういう面から考えると、やはり同じ線量で線量率だけを変える方がアプローチとして行いやすいのではないかなと思われる。もちろんご指摘のように、うまくモデルを設定することができればよいのだが。

[ 小野 ] その際に適応応答ということがあり、一発と二発とでは影響が違ってくるということになってくると、モデル化はそう簡単ではないと思われる。

( 嶋 ) 新しい基準づくりの基盤ができるということは大変アトラクティブである。あるいは線量概念というような言葉もどこかで拝見したような気がするが、そのところは少し抽象的なところであり、具体的にどういうものをイメージすればいいのかな。放射線に関するいろいろな単位があるわけだが、例えば、そういうものではなくて、純粹に物理的な単位で、ダブルストランドブレイクについてはこの線量というようなイメージか。

[ 斎藤 ] 一番単純なのはそういうことであるが、例えば、修復されにくい損傷がどのくらいできるかというのを指標にした線量とかが考えられる。あと、例えば、染色体異常がどれくらいできるのかといったもう少し生物学的なうまい指標が見つければ、それを基準とした線量というのもあり得ると思われる。

私が当面考えているのは DNA 損傷で、修復されにくいものができやすいような条件を基準にした線量というのが、今の物理的な線量より、随分いいのではないかなというイメージを持っている。

先ほどお話をさせていただいたとおり、線と線と比べると、同じエネルギーが吸収されたときに 20 倍も補正しているが、10 倍とか 20 倍という数字に確固とした根拠があるわけではなく、かなり大ざっぱな値をかけて補正を行い、それに基づき線量評価が

行われているわけである。したがって、そういう補正によるのではなく、もう少し生物に近いところの指標を基準にした線量というのができないかということを考えている次第である。

( 嶋 ) そうだとすると、現在使われている、いわゆるラディエーションウェィングファクター、放射線荷重係数というのがあるわけである。私としてはクオリティーファクターとかRBE等から出てくるのだらうとラフに解釈しているのだが、その意味では、放射線荷重係数について、実際のデータあるいはシミュレーションの検証の結果に基づき、例えばさっき言われたように、20という数字はべらぼうに大きくて、実はもう少し低くて10であるというようなことも結論の一部としては入ってくる、あるいは生まれてくるという見通しもあるということか。

[ 斎藤 ] 一番クリアなものとしては、線質係数が現状のものと違うのではないかという基礎データ、線質係数を見直すための基礎データを提供できるということが、まずあり得ると思われるし、さらに一步進めて、新しい線量概念、線質係数を用いる方法にかわるような線量の概念をつくれたらさらにいいことだと思っている。

( 嶋 ) 能美プロジェクトの年次計画中で、ラドンを使うという記載があるが、これは本当にマウスの個体をラドンに照射される予定なのか。平成17年の年次計画のところに、「NNKとラドン」とあるが。

[ 増村 ] 今のところは計画としては、最初に培養細胞の方で実験を行うことをイメージしており、可能であれば、マウス個体ということもあるかもしれないが、とりあえず現在の計画ではNNKと線の方について個体で行い、ラドンの方については、まず培養細胞の方でデータを取ることと考えている。

( 岩田 ) シミュレーションについて教えていただきたい。基本的にマルチスケールモデルのような感じがするのだが、言わんとされているタイムコンスタントについては、生体内の現象のタイムコンスタントと、照射に関するタイムコンスタントがあり、照射の場合に関していえば、積分量でかなりきちんと議論されていることと思うが、その辺りの物理的な説明というのはどの程度検討されておられるのか。

[ 斎藤 ] 損傷のできる過程のシミュレーションについては( 厳密に言うと飛跡構造シミュレーションについては。ラジカル拡散については時間を追ったシミュレーションを行っている。 )、ほとんど時間の概念が入っておらず、放射線が入ったときに何が起こるかをいっぺんに調べてしまおうというねらいである。

DNAの修復過程のシミュレーションについては、こちらは分子動力学シミュレーションであり、時間を追ってずっと現象がどのように進んでいくかということを調べていく予定である。

( 岩田 ) 分子動力学で済む話なのか。

[ 斎藤 ] これはあくまでも基本的な原理を明らかにしようというもの。確かに分子動力学で取り扱える系というのは今のところ限られており、原子数にして数万、最大でも数百万程度である。生体物質の系としては非常に小さなものであり、ある理想的な部分を切り出してきて、そこで起きている重要な現象を調べようということである。

( 岩田 ) それは、構造要素の数で済む話なのか、それとももう少し時間分解能の高いゆらぎみたいなものと、特定の幾何学的配置というもののとの関係を考慮してゆくのか。

[ 斎藤 ] それは両方だと思われる。やはりスケールの小さいということ。あと、追える時間も短いという問題がある。ただ、放射線による生物学的な現象の中でも、かなり長い時間かけて起きる現象もあるが、重要な部分というのはある短い時間に起きる現象でかなり説明できるのではないかと考えている。したがって、その重要な部分を切り出してきて調べようということを考えている。全体を調べるには、もう少し粗いシミュレーション法を使うなり、別のモデルをもってくる必要があると思われる。今のところは、分子動力学でいけるところまでいってみようと考えている。

( 岩田 ) ラジカルを考慮されとなると、電子レベルについても幾つかの代表的な事例について問題設定を行って、その上でMDを行った方がよさそうな印象があるが。

[ 斎藤 ] 確かに、問題設定についてはもう少し検討する必要があるかと思われる。

( 嶋 ) 400日間連続照射される予定のマウスのストレインは、今まで(財)環境科学技術研究所、六カ所村で使われたものと同じストレインを使われるのか。

[ 小野 ] 先ほどのステムセルにおけるミューテーションの方はSWRというストレインで見れないので、それを必ず使う。それから、大腸菌の遺伝子を見る方はGPTデルタを使わざるを得ない。よって実際にはそれらをクロスしたF1でやる。

( 嶋 ) そうすると、合計100匹ということだが、そのいろいろなバックグラウンドも違うものを、それぞれのグループで100匹ということか。実験が大変なのでは。

[ 小野 ] いえ。F1を用意すると、両親からそれぞれ遺伝子を引き継ぐわけであり、D1b-1も入っているし、GPTデルタも入っている。そのネズミを、80匹用い、それを20匹ずつ4グループに分けてそれぞれ別の線量と、それからコントロールのところに入れる。大腸菌の遺伝子の指標については、おそらく結論を出すのに五、六匹で大丈夫だと思っている。一方、D1b-1の方については十数匹は必要ではないかと考えている。別のマウスから臓器を採るか、藤川先生の方は小腸だけなので小腸だけ採ってほかの臓器は同じマウスから採るかということはまだ完全には決めていないが、少な

くとも1グループ20匹ぐらいあればD1b-1のミューテーションと大腸菌の遺伝子ミューテーション両方を見ることができる。それから、メッセンジャーRNAも、ここで見るか、場合によっては、もう1種別のストレインを5匹ぐらいずつ入れようかと考えている。その理由は、マイクロアレイとかメッセンジャーRNAの変化とか蛋白の変化はC57BL系でのデータが多いからである。

それから言い忘れていたが、8月に国際ワークショップを予定しており、その前段階として、海外の研究機関の方にいろいろと聞いてみると、ペーパーになっているものはわずかしかないが、研究をしている人はそれなりにいる。したがって、未発表なデータがそれなりにあるので、そういう人たちに来ていただいて、とにかく同じようなことをやってもしょうがないし、例えばマウスのストレインに関しては、実際に何がいいのかということ、その場で世界の情報を集めてから決めた方が比較をする上でも有効ではないかと考えている。

( 嶋 ) 使われる予定のF1が何であれ、いろいろなマウスのストレインについて、基本はサバイバルカーブのはず。それから、例えば、LD50/30がどれぐらいの値であるかということはもちろん不可欠なデータになるとは思われるが。

[ 小野 ] もちろん出せなくはないと思うが。

( 嶋 ) もうすでに、プリエグゼストしていると思っていたのだが。

[ 小野 ] ジェネティックなバックグラウンドによって低線量の放射線の影響が違うということが出てくるということは今のところ考えていない。もし本当にそうであれば、それは人によって放射線の影響が違うということになる。今のところは、共通認識として、そういうふうになっていない。しかしながら、もちろんそういうデータ出てきたらばそれに対応するつもりであるが。

( 嶋 ) ストレインデファレンスというのはあるはずだと思うが。

[ 小野 ] 寿命にはそんなに違いはないと考えている。いろいろなストレインでやってみて、大体同じぐらいの寿命短縮であったというデータがある。

[ 早田 ] マウスの大きさに起因する違いはあるが。

( 嶋 ) ということは、放射線感受性にも恐らく違いがあるということでは。一番興味があることは、例えばサバイバルカーブで、コントロールの生存率がわかると、照射したサバイバルカーブを書いて、最初のうちは2つのカーブは同じあり、恐らくあるところから2つの線が分かれ始めるはず。そのときに、コントロールで起こっている出来事と、それから落ち始める集団で起こっている出来事とで何が違うかということが、プレディクトできるのではないかと思うのだが。

[ 早田 ] サバイバルだけを考えると、400日の照射であり、コントロールでは死なないはず。

( 嶋 ) だからこそ、先ほどから話が出てきている六力所村のデータがあるのならば、それと同じストレインを使ってサバイバル、あるいは発がん率のデータをそこに依存するというやり方があるのではないかと思ったわけである。確かに、D1b-1も、GPTデルタも使えないわけだが。

[ 小野 ] 突然変異に関しては、それしかできないので、もう考える余地ない。ただ、メッセンジャーRNAとか蛋白とかのデータを取る際には、どのストレインを使ったらいいのかというのは、もう少しお時間をいただきたいと思う。

[ 早田 ] 今の嶋副主査のご指摘については、大変興味がある。したがって、何匹かのネズミを400日以降もそのまま飼いつけて、本当にぎりぎりの年寄りまで生き延びさせて、それと照射後のものとを比較すると、そこで老化現象との比較が出てきて非常におもしろいデータが出るかもしれないと考えている。

( 嶋 ) 400日というと、どうしてもエージングのファクターが非常に強く絡んでくると思われる。

( 田中 ) 事前評価共通チェックシートという中に2番の( 5 )というところに、連携機関以外との研究交流及び国際的展開は十分かという評価項目があるが、これに対する回答というのは、多分、研究計画書の5ページの4番になるのだと思われるが、余りにも一般的な内容であり、これだけでは評価が難しい。

お話を聞いていると、この研究目的を達成するためにこれだけの機関が必要だということとは理解できたが、逆にその目的を達成するのにこれ以外の研究機関というのが必要ではないかどうかというところはよくわからない。

他にもこういう研究が存在していて、そういうところと情報交換をする、あるいはデータを見比べることで、よりはっきりしたことがわかるはずだというように、相手の固有名詞と協力内容を指定するような、例えば、アメリカのどことか、国内のどことか、というように記載いただいた方が評価するうえではありがたい。

連携機関の構成がこれでいいということ、証明する必要まではないと思うが、ご説明いただき、そのうえで、他に似たような研究があるので、そことどういう情報交換するつもりであるとか、もう少し具体的にわかるとありがたいと考えた次第である。

[ 小野 ] 確かに、その記述が欠落していると思う。それで、実際には、この研究計画書を提出した後であるが、国内においても、また、国際的にも情報交換はきちんと行う必要があるということで、8月の末には国際的なワークショップを行い、例えばさっきのマウスのストレインであれば、遺伝的な影響の方はもう変えられないとしても、もう1つの方ではその結果を反映し、まだ変更する余地もある。そういうように、情報を合

わせながら進めていくということは計画している。

(田中) この研究をするのに、今、参加している機関が必要であるということはわかるのだが、他にもっと参加してもらいたい機関があるんだけど、残念ながら、今は参加できていないというようなところはあるのか。

[小野] 低線量の影響研究というのは、先ほど放医研というお話があったが、その他にも、例えば、酒井先生のところでも実施されているし、大々的ではないが、大学でも培養細胞等を用いて少しは行われている。

(酒井) (財)産業創造研究所などでもやられている。

[小野] そういう方々に入っていただく必要があるかないかという議論はあると思う。

[早田] 予算との兼ね合いもある。

(田中) お金をつける、つけないということは、それはまた全然別の次元の話だと思うが、せっかく実施されるのであれば、排除せずに情報交換等、成果を利用しようとか、そういうことは必要だと思われる。

[小野] それはご指摘のとおりである。国内的にも国際的にもなるべく情報を収集するようにして、ミーティングをするときには、例えば、酒井先生のような方にも入っていただいて進めていくつもりで考えている。

(田中) 酒井先生が1年に一遍この会議で、意見をお伺いするだけでは、確かにもったいないと思われる。

#### (8) 総括

岩田主査から、事前評価ヒアリング及び第1回目の議論については、一旦ここで終了し、事前評価としての総括に移る旨が伝えられた。最初に岩田主査から総括が行われた。

(岩田) まず、全体の方向性について。前原子力委員長も現原子力委員長もリスク評価とかアンサートンティーとか安全とかそういったことに関しては一番の専門家でいらっしゃる。そういう専門家の立場から見て、今回のクロスオーバーの研究計画がどこまできちんと詰められているか、あるいは、出てきたデータに基づいて、どういうふうに動的に実験計画を組み直し、さらにはシミュレーション等により、どのようにメカニズム等をエンドースできるかということが重要であると思われる。そして、最終的には現状の科学技術において、どこまではっきりしたことが言えるか、それから今後新しい実験が必要だとしたら、どういう実験計画が考えられるかといったところを、ポジティブな情報として、できるだけ出せるようにまとめていたら考えている。

そういう意味では、むしろサイエンティフィックに大事なことをどんどん言っていたいて、それを基に当初の研究計画を、できるだけ具体的に後から議論しやすいような形にまとめ上げていけたら考えている。皆様のご協力をよろしくお願いしたい。

引続き、嶋副主査から総括が行われた。

（嶋）まず、このプロポーザルは、さらにリバージョンされる時間的余裕があるのか。

（石井）あります。

（嶋）ならば、先ほど北村委員からご指摘のあった、評価しやすい記述の方法というのを十分にお考えいただきたいということが1つ。

それから、低線量、あるいは低線量域ということに関して、この場でのおおよそのコンセンサスについては、形成されたものと考えている。

あと、田中委員からご指摘のあった、ほかの研究機関等々との参画、その形態も含めて、に関しても一度お考え願いたいということ。

さらに、今年の夏にワークショップをやられて、最終的なマウスのストレインの選択をなさるといことなので、いろいろなバックグラウンド等含めて、それまでに十分にご検討をいただきたいということ。

というようなところが私の認識したポイントである。

最後に、岩田主査から、「リナックス方式」を引き合いに出され、本クロスオーバー研究においても、プロジェクトリーダーのもと研究成果をできるだけオープンに発表することにより、研究の発展が図られることを期待しており、評価委員に引続き協力をお願いする旨の発言があった。

また、最終的な事前評価結果については、各評価委員記載のチェックシート、事務局にてまとめる議事概要案をベースに総合所見案の形で嶋副主査にとりまとめていただき、岩田主査が評価責任者として最終決定を行う旨が伝えられ、了承された。

以 上



第 2 回 クロスオーバー研究評価WG  
議事概要

1 . 日 時 平成 1 6 年 2 月 1 0 日 ( 火 ) 9 : 3 0 ~ 1 1 : 3 0

2 . 場 所 文部科学省ビル 1 0 F 3 会議室

3 . 出席者

WG : 岩田修一 主査(東大)、阿部勝憲 副主査(東北大)、北川源四郎 委員(統数研)、  
北村正晴 委員(東北大)、近藤達男 委員(東北大)、酒井一夫 委員(電中研)、  
田中治邦 委員(東電)、丹羽太貫 委員(京大)、三宅千枝 委員(元阪大)

PL : 木下幹康(電中研)、小野哲也(東北大)

研究機関 : 金田保則(東大)、陳 迎(東大)、天谷政樹(原研)、園田 研(電中研)

福田由佳(新日鉄ソリューションズ)、鈴木知明(情報数理研)

文科省 : 石井利和 量子放射線研究課長

4 . 議 題

( 1 ) 開会、配布資料確認、事務局説明等

( 2 ) 事前評価ヒアリング「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 ) 議論(自由討論)

( 4 ) 主査総括、事務連絡、その他、閉会

5 . 議事概要

( 1 ) 開会挨拶及び委員紹介

石井課長による開会挨拶に引続き、第 1 回のWGにおいて、都合により遅参、欠席された  
北川委員、丹羽委員より自己紹介が行われた。

( 2 ) 配布資料の確認

事務局より配布資料の確認が行われた。

( 3 ) 評価のポイント及び評価の進め方に関する説明

事務局より配布資料に基づき、評価のポイント及び評価の進め方について、説明が行われた。

事務局からの説明に引続き、岩田主査から本日のテーマは、高線量領域における材料挙動  
特性を対象とした研究課題であり、系の予測可能性、あるいは先見性を意識した内容となっ  
ており、先生方の活発な議論を期待したい旨が伝えられた。

( 4 ) 事前評価ヒアリング「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」

事務局からのヒアリング方法の確認に引続き、木下プロジェクトリーダーからプロジェクトリーダーを用いて、研究計画案の説明がなされた。

ヒアリングは約 1 時間に亘って行われ、大きく、〈総論〉と〈各論〉に分けて実施された。〈総論〉に関する主な質疑は、以下のとおり。

( 丹羽 ) ケミカル・コンポジションの観点において、核分裂生成物の寄与の程度や、非常に微量に生成されるため大した寄与はないかもしれないが、プルトニウムや、ウランから生成したマイナーアクチノイド原子が、実際どのように寄与しているのかについて教えていただきたい。

[ 木下 ] ウランが分裂して一番大量に生成するのはキセノンやセシウムであるが、生成物には重要な化学的性質をもつ物質も幾つか含まれると思われる。ただ、これは軽水炉の場合であるが、現在着目している現象においては、余り温度領域が高くないために、そうした物質同士は割と分散して存在していることが確認されている。凝集した場合、確かに物質として非常に重要なものはある。モリブデン等の酸化ウランの結晶構造に適合しない物質は析出していく傾向があるが、カリフラワー構造のように全体的な構造に変化を及ぼすほどの絶対量はない。

( 丹羽 ) カリフラワー構造ができるということは界面があるということと解釈できるが、界面の外側には何が存在するのか。

[ 木下 ] 酸化ウランの外側には稀ガスが存在する。この仮説は資料には記載していないが、亀裂ができてその中にガスが蓄積すると、レンズ状に膨らんでいってガスのたまりになり、亀裂の表面がカリフラワー構造になるのではないかと考えている。

ただ、一部のジルコニウムや酸化ジルコニウムは、酸化ウランの結晶構造に取り込まれるため、完全な酸化ウランではないが、酸化ウランの結晶構造は保たれている。また、析出できる物質は全て結晶構造の外側へ排出されている。

( 丹羽 ) 加速器で打ち込む物質は何か。

[ 木下 ] 現在、主に使用しているのはキセノン原子である。ただ、大きさ・質量を変え、運動エネルギーを変えれば、ホットロッドの性質を変化させることができるので、そういう研究にはほかの物質を使うことも考えられる。

(丹羽) 燃料の外側が400数十度という説明があったが、ホットロッドで原子を打ち込んだときの瞬間的な運動の速度からすると、周辺は局所的に非常に高い温度に達することになるのではないかと。

[木下] イオントラック、散乱過程の運動エネルギーは、非常に高い温度に相当する。時間の依存性があるので簡単には言えないし、いわゆる温度という巨視的な概念が成り立つかどうかは難しいところである。

(阿部) 全体的なことに関わるかと思うので質問したい。タイトルが「エンジニアリング」となっており、主要な対象が酸化ウラン燃料になっている。そうすると、例えば前回の生体に関する研究と比較した場合に、何十年も使用実績がある酸化ウランを扱うので、それに関して膨大な研究開発実績があることになる。その場合、燃料体の照射中の挙動に関して、例えば時系列の情報や、律則因子の決定があると思うが、燃料体に関するエンジニアリングという形の課題設定をどのように行ったのか。

[木下] ここで取り上げた原子燃料セラミックスの組織が大きく変わるという現象については、温度が高くなって、温度によって結晶粒が成長するとか、いわゆる炉外でシミュレーションできるような事例は幾つもあって、それは既存のいわゆる金属物理とかそういったセラミックスの知見で解決できてきた問題だと思うし、エンジニアリング的にも十分設定可能な課題になる。

将来的に今の燃焼度から更に2、3割上昇させた場合、現在の燃料集合体の壁面において、ロッドピークで70ぐらいに達しており、ほとんどすべての燃料がこの組織変換の領域に入るため、高燃焼度化の時期になるとかなりのパーセンテージのロッドが70以上に達することになる。平均燃焼度を変えなければ余り変化はないが、本当の意味で燃焼度を上昇させる場合には、このような材料についての取り組みが非常に重要になるという時代背景がある。

いわゆるエンジニアリングなので、熱伝導率や体積膨張率、あるいは機械的な性質については常に国際プロジェクトなどでデータが取得されていて、実際に今の設計で問題ないという事が確認されている。ただ、将来的に高燃焼度化をおこなった際に、性能の向上を考えた場合、材料設計の指針は全く分かっていない。今、わかっているのは、材料の作り方とその性質のみである。また、体積膨張に対しての対応についてもよくわかっておらず、体積膨張の少ない材料が望まれる。

実は、その辺はフランスの研究者も課題にしており、我々も、経験的にそういうデータはもっている。現在そのメカニズムは解明されていないが、解明が進めば、この

非常に高い燃焼度領域でも安心して使える燃料材料の作成が可能になるという意味で、エンジニアリングのベースになることが期待される。

（阿部）高燃焼度条件における燃料挙動の体系化を行うのであれば、設計方針など色々な指針が得られ、貴重な知見と思う。リム組織やその形状について、モデルとして非常に興味深いとは思いますが、全体の燃料挙動に関する体系化の中における位置づけや、ほかのリスクに対しての全体の関連を定義することがこの課題においては必要ではないかと思う。

〔木下〕ここでまとめた課題には、ご指摘の観点はほとんど入れておらず、むしろ物理的な観点からの研究計画になっている。低温で高照射量のときに境界面が発生する現象というのは、照射誘起析出の問題として普遍性がある。金属材料の場合も、照射下でシュラウドが割れたりするのは、照射誘起析出の問題が原因になっている。高照射・高線量という非常に厳しい条件で発生している、セラミクスを対象とした現象について、制御可能であるとか、制御の方法についての知見が得られれば、もっと広い意味で金属材料まで含めて制御が可能になると期待されるので、そういう意味でここではエンジニアリングという言葉を使っている。したがって、確かに燃料体系という観点からは非常に狭い範囲を対象としていると思う。

（近藤）もっと説明を伺ってからのの方が適当かも知れないが、質問させて頂く。核燃料開発では、現在までに膨大な研究実績があるが、ご説明にもあったとおり、大体経験主義的なところで行き詰まりつつあり、計算科学等の基本的な解析に回帰する必要があるという大きな流れは理解できた。その意味で非常に大事な仕事だと思う。

ただ、古来、こういう材料の研究というのは、ダメージ発生のメカニズムを研究して解明すると技術の発展につながるという基本的な流れがあるが、50年間研究が行われてきて、いまだに、ダメージの研究は非常に盛んであるものの、なかなか対処方針を打ち出すには至っていない。しかし勿論、こういう研究は継続的にやっていく必要があると考える。

ただ、指摘したいのは、メカニズムの解明と、対処方針との間のギャップが大きいことである。カリフラワー構造もダメージの典型的なもので、これ自体は困ったことであるが、そこから何か新しい手がかりをつかもうというのがこの研究だと思う。そのギャップを簡単に超えられるはずだ、ということになると非常に疑問を感じるので、この研究はここまでいければ相当成功と考えていい、ということが分かるようであると非常にいいと思う。長い道のりだと思うが、まずそれが1つ。

もう1つは、燃料とか構造材料の課題克服について。燃料性能上のクリティカルパ

スは、燃料の中身だけじゃなくて、例えば被覆材料をどうするかなど、まだまだ工学的に乗り越えるべき行程が多数ある。損傷の問題は、典型的に核融合研究で非常に苦しんでいるところであり、そういった課題にこの研究がどの程度の波及効果を持つのかなどが分かると非常に有意義と思う。

[ 木下 ] これからご説明する部分で回答できることと思う。

引続き、木下プロジェクトリーダーからプロジェクターを用いて、＜各論＞の説明が行われた。

#### ( 5 ) 議論

岩田主査から、時間の都合もあり、これよりさきは、両プロジェクトリーダー、それから各連携機関の代表者にも積極的に参画いただいて、30分間の自由討論に移る旨、発言があった。

( 丹羽 ) 評価項目で独創性・新規性というのがあるが、何かこのようなことがこれまで全くやられてなかったとしたら、逆に不思議な気がする。例えば、ホットロッドは、温度を上げなくても、分子1個1個があたかもすごく高い温度になったような挙動を作り出せ、化学としては非常に興味深い。非常に低温でそういうことができるならば、非常におもしろい領域と思う。

[ 木下 ] 加速器を使用すると、打ち込んだ原子が材料の表面近傍に留まることを利用して材料の表面を改質するであるとか、あるいは特殊な化学反応を起こさせるようなことや、あるいはマイクロマシンのための加工など、最近は随分研究が進んできていると思う。ただ、過去には、例えば半導体のイオン注入などには結構使われてきたが、原子力材料に加速器が使われる場合は、やはり損傷という観点からの利用が主であった。それを積極的に利用しようという発想は余りなかったので、プラスに使おうという考えが現れたのは割合最近ではないかと思う。

( 丹羽 ) そこで、修復という現象がポイントになるが、それはきれいに修復が起こる条件が最終的に確定できれば、どのような放射線下でもびくともしない材料ができることになるが、そういう条件の確定について何か見通しはあるのか。

[ 木下 ] 先ほど、修復力について言及したが、ああいうポテンシャルというのは余り自由につくることができないと思われる。金属材料について材料開発に取り組んできた経験上、

幾つか失敗したと思っているのは、改善を意図して材料の熱処理や材料の成分などを変えることにより、そのポテンシャルが変化して全く別な現象が現れることである。

そのため、いわゆる材料の問題というのは、これをやれば全部よくなるということではなくて、むしろつくった後の使い方とか、あるいはライフデザインを考えることが必要であり、最初の段階、次の中間段階、末期における変化が予測できて、それに対応した応力や照射量のかけ方などを設計しなければならないと思う。そうすることで、初めて最後まで安全だということになる。あるいは、途中で析出が起きた場合でも、機械的条件が余り厳しくなければ割れには至らないので、要は、総合的設計を行って、最後まで大丈夫なように工程を設計していくことが大切になると思う。

したがって、すべての問題に対して最初から大丈夫と言える材料はできないという回答になる。

そういう意味で時系列を追うことのできるモデリングというのは、検証可能な範囲でしか使うことができないので、本当の意味での定量性というのは、第三の現象が発生したりするので厳密には難しいと思うが、ある範囲内であればモデリングは可能であり、これを利用して総合的なライフデザインをすべきだと思っている。

（北村）内容的には研究テーマの概要と必要性に関する部分について、質問したい。

研究は、広い意味の材料設計に関する話に1つはなるのかと思う。それに加えて、先ほどの話から考えると、材料設計と環境設計、あるいはマネジメントについて総合的に考えていこうということになるのか。もちろんそれを全部最初からシミュレーションすることは出来ないが、その中で考える道筋をつくる大事なガイドラインをここから見だしていこうという理解で良いか。

[木下] 最終的にはそうしたいと思う。ただ、この研究の中で私が一番期待しているのは、今までいわゆる応用数学で複雑系という論理を材料のモデリングに応用したことは余らないことから、環境に対する応答や、使用方法、デザインをしていくもとなるロジックを提案できるだけでも成果だと思っている。

（北村）それは私にも十分理解できる。材料というのは長期間に亘り実験を行って、実験的な知見の積み重ねで経験科学的に進んできた部分が相対的に多いので、そこに対して少しでも予見的な要素を組み込んでいくための営みと理解する。

また、新しいエンジニアリング概念の構築についての話の中で、最終的に高信頼性（予兆の監視）の達成による設計自由度の拡大にまで言及している。これは非常に大事な条件だと思う。それは、あるいは材料を使っていく際の基本的な考え方の大きな変化につながる部分と思う。

だから、とても大事だと思うのだが、今度は高信頼性技術（予兆の監視）という部分の中身が、今の話からは見えてこない。最終的にそこまで研究を進めるという理解でよろしいか。

[ 木下 ] 何としても踏み込みたいと思っている。挑戦事項の1つに原子炉中の計測系の話を挙げたが、結局、データが取得できないことには何にもならない。もちろん、燃料などでやる方法は一定の期間使用したら、燃料を取り出して切断して、ほかのラインはそのまま走らせておいてデータを取るのが一般的だが、それには炉外ではなく、やはり、炉内のデータを取るのが一番重要だと思う。現在、ノルウェーではハルデンプロジェクトという軽水炉燃料の炉内データを取るメッカがあるのだが、そこでは温度、圧力や変形などのデータしか取得できず、材料データというのはほとんど取れていない。

材料データを取得しない理由は、役に立たないからである。経験主義的な方法を使っている以上、例えば転位がどうなった、転位結果がどうなったというような材料データの細かいことを言うことは出来ない。それでは、予兆の監視ということには全然結びつかず、エンジニアリングとしては成り立たない。

したがって、加速器の中で例えば電気抵抗を測ることは、もうそれだけでチャレンジになる。炉内照射下での電気抵抗測定に挑戦したい。そういう視点に立って技術開発については、ほかでやったものを借りる形になるかもしれないが、うまく情報交換あるいは技術交換して、何らかの結果を出したいと思っている。

( 北村 ) ぜひそのような形で進めてもらいたい。やはり予測というのは、途中途中で監視が入ってくると全然違う話になる。そのことを十分認識してのテーマ設定と理解するので、その具現化を、ぜひよろしく願いたい。

( 三宅 ) カリフラワー構造の先端について、細かく純粋な結晶という話があったが、酸化ウランの純粋な結晶が析出しているのか。

[ 木下 ] ジルコニウムのように複合酸化物で同じ結晶系のものは入るかもしれないが、結晶系が異なると排除され、カリフラワー構造の外部へ追い出されることになる。

( 三宅 ) そうすると、次々できる核分裂生成物も固溶しない物質はみんな外部へ排除されて、界面に蓄積されると理解してよろしいか。

[ 木下 ] 実際、例えばモリブデンや金属微粒子は、カリフラワー構造の表面近傍に集合している。つまり、結晶から排除された格好で表面近傍に集合しているという状況証拠しか

ない。それから、ただ、モリブデンなどでもある程度固溶するので、恐らくEPMA（電子線マイクロアナライザ）で測定すると、ある程度のモリブデンが固溶していることはあると思う。ただ、固溶限を越えたものは全て外部へ排出される。

（三宅）そうすると、次々照射されて時間的にどんどん核分裂生成物が生成することになる。そういう状況でも、どんどん余計な物質は排出していくというメカニズムが働いているということか。

〔木下〕結晶粒径が0.2ミクロンと非常に小さいものなので、低温ではあるが、照射誘起拡散の到達範囲になる。そのため、あれだけ粒界が存在すると、まずそこへ移動してしまうのだと思う。したがって、リム組織ができると悪いという意見もあるが、個人的には燃料の一番安定な究極の形なのだろうと思う。酸化ウランがその結晶構造を永遠に保って、それ以外のものは外に排出する。ただ、それがどう排出されるかがエンジニアリング上の問題になる。

（三宅）日常的に利用している再結晶の手法がたまたま、この現象において、1,000度近辺のところで現れたのではないかと直感的に感じている。もちろん強い放射線のあるし、それからどんどん核分裂生成物なんかも時間的に供給される状態なので、反応速度論が入って、かつ非平衡系での取り扱いが数学的には難しい状態なのだろうが、可能性としてあるのではないかと。実際に、ウランの無機化合物でも400～500度で容器の中に置いておくと、夜の間に結晶が大きくなる。

それから、第一原理とか分子動力学の計算のときに、例えば酸化ウランのかわりにセリアを使用する場合、セリウムのパテンシャルはどのようなものをお使いになるのか、また、核分裂生成物の酸化数がどんどん変化していくが、ポテンシャルにどう反映するか、ということを質問したい。

〔木下〕質問の件について、現在取り組んでいるのは第一原理計算なので、基本的に一番安定な電子状態である結晶構造のモデルを作成して、そこから解析を進めていくことになる。

今、話にあったようにキセノンなどが入ってきて、それが電荷を持ってしまい、価数が増える場合、それをどのように取り扱うかというのはもう無数にある。したがって、ある程度価数が増えたときには、こういう定性的な影響が出るということを把握しつつ、代表的なもので調べていく以外にないという気がしている。

それから、酸化ウランとセリア、酸化セリウムは、もともとかなり電子状態が異なるので、その問題は、第一原理計算を行うときには当然意識している。だから、その



辺は実験で本当に違いが出てくるのか、実験の方で酸化ウランと同じようなことが見えてくれば良いと思っているが、確かに若干違う部分もあり、酸化ウランと異なり、セリアは酸素を放出する。そういった異なるところが今のリム組織やカリフラワー構造の問題に対応するかどうか、という基準で見たいと思う。

特に電子顕微鏡で調べると、電子線照射などをした場合、当然対象の荷電が変わり、それで特異な現象が起きるのであれば、なぜそのようになるのかというような視点で調べていきたいというふうに思っている。まず、やはりデータがあってからの話になる。

(三宅) もう1つ、その「見る」という話があったが、実際に何が起きているのか、どこまで観測できるかを含め、現象を実際に「観察する」というのを是非進めてもらいたいと思う。

[木下] 見るというのは、実験的な方法のことか。

(三宅) そう。例えば、TEM(透過型電子顕微鏡)などでin situの観察ができるのか。

[木下] 今、高密度電子励起の効果に取り組んでいるが、高密度電子励起の効果というのは、イオントラックが走ったところだけ乱され、局所的に非常に高温になる。ただ、酸化ウランの場合には、先程1.5keV/オングストロームという話があったが、一定以上のエネルギーにならないと閾値があるため変化が出ない。そのため、電子顕微鏡で見ると、イオントラックが走ったところだけ少し変わって見える。そういう点が幾つか、トラックが走ったところというのはスポット状に見えるということが分かる。

あと、これから取り組みたいと思っているのは、稀ガスなどが入ったときにそういうスポットの系が増えるのかどうか、という問題である。

(三宅) 一旦できたカリフラワー構造は、続けて照射してもそのまま残るものなのか。

[木下] 実炉の場合は残っている。ただ、先程説明したように、ガスの量がどんどん増大するので、そういう意味で系の状態は少しずつ変わってくると思うが、構造そのものは変わらない。

実炉の燃料に関しては、まだ今でも継続して電子顕微鏡で、いわゆる結晶中の転移の起こり方や、稀ガスの挙動など、特に稀ガスについては非常に小さなバブル、ナノメートルサイズのバブルからサブミクロンサイズのバジョンまで幾つか種類があるが、そういうバブルの統計などをとって、どのようにバブルが成長、消滅するのかに

ついて調べている。ただ、それは動的な測定ではない。動的な測定は、やはり電子顕微鏡と加速器を組み合わせるとか、あるいは電子顕微鏡の中で模擬的に照射するとか、そういったことで調べるしかないのではないかと考えている。

(北川) 細粒化という興味深い現象があって、それを解明しようとしているところは大変結構であると思うが、この研究の中で実験的な部分、あるいはその関連する理論の部分と、数理的な方法の部分、それからエンジニアリングとしての部分があり、それらがうまく関連しているかどうか、多少危惧を感じる。

例えば、複雑系というような話出てくるが、その非線形数学あるいは数理科学の部分でいう複雑系というのは、割と単純な非線形モデルを解いていくと一見複雑な現象が現れるものの、恐らく実際の場面で出てくる複雑さというのは、非常に高次元の多粒子のシステムで様々な要素があり、相互作用があるという複雑なモデルの結果として発現するものと思う。したがって、直接、いわゆる複雑系の方に着眼してもなかなか成果が得られにくいのではないかとということを危惧する。

それから、タイトルが「新しいエンジニアリング」となっているが、その割にはそれに向けた形の研究というようになってないのではないかという感じがする。挙動の解析という方向、細粒化の方に集中し過ぎているのではないか。

こういう研究が直接的に何かエンジニアリングの問題の解決につながるということがあるのかどうか、そこが分からなかった。

[木下] 最初の複雑系の問題については、反応速度の方程式系をまずつくりたいと考えており、そのときにできるだけ単純化したいと思っている。つまり、説明の中で複合項という言葉を使っているのは、要するに非線形項が非常に単純な線形の速度論系の中に入ってきて、その項が全体に影響を与えるような、出来るだけ単純なモデリングで説明したいと考えているからである。たくさん速度論方程式系をつくることは全然意識していない。そのため、特にそれと、界面発生の問題に結びつくような非線形性を探索しようと思っている。

最終的に複雑系というキーワードを使っているが、複雑系の考え方で説明できるかどうかについて、現状説明できないところはある。

(北川) モデルを単純にするというのは非常に大事だと思うが、そのときにやはり実際の現象との整合性というのが非常に重要で、そういう意味で環境などでも単に仮定したモデルだけでシミュレーションやるだけでなく、実際のデータと適宜合わせていくような形で何らかの工夫が必要ではないかと感じた。

( 近藤 ) 3 点ほど申し上げる。

照射の問題を核分裂性物質で、かつセラミクスでやるという場合には、確かにプロセスは非常に複雑になるが、燃料がその機能を果たすという観点から考えると、燃料としての健全性が問題になる。ただ、これを構造材料の健全性と比較すると、燃料が被覆材の外に飛び出さないで熱が取り出せさえすればいいという意味で燃料の方がずっと楽な気もする。そういう意味でとらえると、確かに燃料について研究を進めて、構造材料にフィードバックしていくというのは割合近道かもしれないと理解した。

しかし、一方で、今度は、有効性とか科学的波及効果が問題になると思うのだが、構造材料の技術の中にどのくらいこれが波及していけるかという、非常に意味のある基礎固めにはなるけれども、エンジニアリングまで行くのは、逆に難しいかもしれないと思った。だから、その意味では、納得した点と、やはり限界を相当はつきり意識しなければいけないのではないかと思った点がある。それがまず第 1 点。

第 2 点目は、構造材あるいは機能性材料が要求する健全性に関連して、説明の中で燃料のインパイル試験で、例えば電気伝導度などの物性があまり計測されていないという指摘があった。核融合の研究においても確かにそういう傾向がある。いわゆるフュージョンフューエル（核融合燃料）と言われているリチウムオキサイドなどの研究では、トリチウムの生成・放出であるとか、輸送などの現象には非常に力を入れているのだが、構造・形態の健全性になるとあまり検討が進んでいない状態にある。一方、絶縁材の研究では精細に照射下で計測がなされている。したがって、問題の核燃料の物性測定は方法論的にはかなりそちらの方に近い気がしている。ただし、もう既にコンタクトしているのであればそれで良い。そういう人材だとか技術というのがこのプロジェクトの中に入っていないかもしれないと思ったのでコメントさせていただいた次第。

3 番目は研究交流についてだが、確かにいろいろな形で濃密な交流を考えておられるものの、全部同じ分野の仲間に限られている。異分野交流ということ考えたところ、一番至近距離にあるのは核融合かと思うが、そういうことで、特に先程言及したフュージョンフューエル、これを核融合では増殖材料と言っているが、問題にしているところは非常によく似ている。さらに発展すれば絶縁材料の話もある。増殖材料は構造材料ではないが、しかし構造的な意味での健全性を相当要求するので、問題点としては同じという気がする。以上、3 点。

( 田中 ) 質問が 1 つと意見が 1 つ。質問は、研究の進め方について。炉内試験について、実際にどういう炉で行うのかということがまだイメージできないので、説明して欲しい。

それからもう 1 つは、発電現場への将来の波及効果に関連して、発電現場における新しいエンジニアリングを目指してということになっていると思うが、その理解が正

しいかどうか。燃料の設計という意味ではすごく重要な新しいテクニックというか知見を得て設計に生かせると思うのだが。発電現場において燃料に対するモニタリングというか、商業用の原子炉の中で燃料の中を見るというのはなかなか困難であり、発電現場におけるエンジニアリングというのは、この表題の中から何なのかということが十分に分らなかった。それは直接的ではなく、発電現場に適用する燃料の開発設計という意味での新しいエンジニアリングであり、運転管理という意味ではないという意味かと想像したのだが、そういう理解でよろしいか。

[ 木下 ] 概ねそのように考えている。

( 田中 ) 原子力がエネルギーを供給していくためには、燃焼度を高めていくということは、トン当たりのウランがどれだけのエネルギーを出せるかという意味で経済性に結びつく話なので、ぜひ推進してもらいたいと思う。

[ 木下 ] どういう原子炉で炉内試験を行うかということについて、現在考えているのは、中性子が利用できる試験炉を使うことを考えている。一般的な商業炉のレベルには全然達してなくて、まずそういうキャプセル照射ができるような炉を検討している。

( 酒井 ) 項目で申し上げると、有効性とかあるいは波及効果の項目になるかと思うが、さまざまな損傷に対する自己回復、あるいは自己修復というのは非常に興味深いと思う。ただ、先ほどのやりとりの中で、自己修復のポテンシャルは幅が狭いという、何か展開について余り積極的でないようなご意見があったが、その点は如何。

[ 木下 ] 実際に、例えばイオントラックで回復する現象があるが、注意してもらいたいのは、回復していい場合もあるが、場合によっては悪い方向にいく場合もあるということ。つまり、そういう拡散が加速されるということは、拡散が加速されてもとへ戻る場合もあるが、何かクリティカルパスができると別の方向にいて、ほかのもので析出していくと場合があるので、制御する範囲が非常に難しいという意味である。

そのため、実際に、複雑系という言い方が正しいかどうか分からないが、パラメータ依存性がすごくシビアであり、外側のパラメータを少し変化させるだけで、何かほかのパスがずっとできてしまうことまで、考慮しなくてははいけない。

( 酒井 ) そこところが明らかになれば、特にこういうシビアな条件で使わなければならないさまざまな材料について、非常に大きな進展につながるのではないか。

[ 木下 ] 難しいのは、実際の実験というのは非常に複雑な問題が多くて、一方、実際に我々が計算するのはすごく単純な系でないと答えが出ない。したがって、その対応関係がちゃんとできてれば、つまり定性的な結論が信頼性に足るようなものが出せれば、本当に役に立つものができると思う。ただ、その場合、そのモデルが使える有効範囲というのをどうやって保証するかというのは、これから考えていかななくてはならない問題だと思っている。

( 岩田 ) ある程度研究が進んだ段階では、むしろここに座っているメンバーの全員がある意味で研究活動と一緒に取り組む仲間と思って参加してもらえればと思う。

( 北村 ) 今、いろいろな委員の先生方からのコメントにもあったとおり、この問題はある意味では相互エンジニアリングとまでは言っていないものの、ターゲットを絞っているにもかかわらず、その範囲でさえ非常にいろいろな周辺とのインターアクションが大きい領域だと思う。したがって、今のこのチーム構成で進めていくのはもちろんそれではよいと思うが、話の展開に応じて研究協力を非常に柔軟にして、場合によっては不連続に展開することも含めて、いつも各メンバーの方に意識してもらえれば大丈夫ではないかと思う。

#### ( 6 ) 総括

岩田主査から、事前評価ヒアリング及び第 2 回目の議論については、一旦ここで終了し、事前評価としての総括に移る旨が伝えられた。最初に岩田主査から総括が行われた。

( 岩田 ) 本日の時点における評価の方向性について総括させていただく。このテーマそのものが新しいエンジニアリングというような名前を持っており、その意味で新しい地平が開けるかどうかということに関しては大変期待の多いところだと思うし、それだけやる側にとってもやりがいのあることと思うので、今後ともぜひご忌憚のない、そして厳しいご意見をいただければと思う。

また、この研究のポイントは、既存の研究が、データとモデルだけで、考察を加えて何らかの結論を出していくようなタイプの研究だったのに比べて、その後のデータ取得、計画性や、さらにはそれを通して新しい原子力エンジニアリングの 1 つのパラダイムを提案したいという目標を含んでおり、その分だけ難しいということは私も十分認識している。先生方におかれてもその点についてはいろいろなご意見があることと思うので、随時メールなどにより指摘、評価、あるいは提案をいただければと思う。皆様のご協力をよろしくお願いしたい。

このテーマについては、阿部先生が取りまとめをお願いしたいと考えているので、阿部先生からも総括をお願いしたい。

引続き、阿部副主査から総括が行われた。

（阿部）委員の先生方からは、大変貴重なご意見が出たと思う。一通りずっと聞かせて頂いて、何とか工学的に意味のあるようなモデル化や体系化など、そういうことを目指すという意味で、難しく、かつ新しいチャレンジなのだと思う。

ただ、そのためには、何人かの委員の先生からもご意見いただいたが、実際のエンジニアリングとしてはどういう意味づけが図られるかということ。それから、実際の燃料等で起こっている挙動に対して、これまでの知見等を含めて、十分有効なコミュニケーションがされるように、燃料の専門家などに参加していただくことも視野に入れ、もう少しメンバーをフレキシブルにしているいろいろなことを検討されるのが良いのではないかと思った。ぜひ頑張っていたきたいと思う。

最後に、岩田主査から、最終的な事前評価結果については、各評価委員記載のチェックシート、事務局にてまとめる議事概要案をベースに総合所見案の形で阿部副主査にとりまとめていただき、主査が評価責任者として最終決定を行う旨が伝えられ、了承された。

以 上