

平成15年度終了課題の事後評価結果について（案）

平成17年4月19日
原子力委員会
原子力試験研究検討会

1. 評価対象課題

平成15年度に研究を終了した先端的基盤研究及び総合的研究（クロスオーバー研究（注））の55課題を対象に事後評価を行った。

（注）クロスオーバー研究は、各分野において特に複数の研究機関のポテンシャルを有機的に結集して取り組む必要がある課題について、研究機関間の積極的な研究交流のもとに研究開発を推進する制度として平成元年度に発足。

2. 研究評価実施課題の分野別課題数

- | | |
|-----------------|---------|
| ① 生体・環境影響基盤技術分野 | : 25 課題 |
| ② 物質・材料基盤技術分野 | : 21 課題 |
| ③ 知的基盤技術分野 | : 7 課題 |
| ④ 防災・安全基盤技術分野 | : 2 課題 |

3. 評価の実施方法

今回の評価は「原子力試験研究に係る研究評価実施要領」（平成13年5月15日、原子力試験研究検討会）及び、参考1「原子力試験研究の事後評価における評価の基本方針及び観点について」に基づき、実施された。

また、具体的な評価作業については、原子力試験研究検討会に分野毎に設置されている研究評価WGにおいて、研究担当者が作成した共通調査票（研究期間、研究予算、研究目標、得られた成果、成果の発表実績及び自己評価等を記載）及び研究担当者からのヒアリング（説明15分、質疑8分）により実施された。個別の課題に対する評価結果については、課題毎に定めた担当評価委員及びWG主査が研究成果や指摘事項等の概要をとりまとめた総合所見を作成し、A, B, Cの3段階評価による総合評価を行った。

評価の基準については以下のとおり。

- A：当初の計画以上の優れた成果が得られた。
- B：ほぼ当初の計画通りの成果が得られた。
- C：当初の計画以下の成果しか得られなかった。

4. 今回の評価における特記事項

今回の事後評価においては、平成元年度から平成15年度まで実施されたクロスオーバー研究の第3期の事後評価が行われた。

5. 評価結果一覧

分野名	総合評価			計
	A評価	B評価	C評価	
生体・環境影響基盤技術	15	8	2	25
物質・材料基盤技術	7	13	1	21
知的基盤技術	4	3	0	7
防災・安全基盤技術	1	1	0	2
計	27	25	3	55

<添付資料>

- 参考1 原子力試験研究の事後評価における評価の基本方針及び観点について
- 参考2 各分野における研究評価の実施状況について
- 参考3 A評価課題の研究概要について
- 参考4 評価結果一覧及び各課題毎の総合所見
- 参考5 原子力試験研究検討会委員名簿

原子力試験研究の事後評価における評価の基本方針及び観点について

1. 評価の基本方針

平成13年11月に内閣総理大臣決定された「国の研究開発評価に関する大綱的指針」に基づき、評価は、必要性、効率性、有効性の観点から実施する。「必要性」については、科学的・技術的意義（先導性）、社会的・経済的意義（実用性等）、目的の妥当性等の観点から、「効率性」については、計画・実施体制の妥当性等の観点から、「有効性」については、目標の達成度、新しい知の創出への貢献、社会・経済への貢献等の観点から評価を行う。

特に、原子力試験研究の評価においては、科学技術を振興するため、優れた研究開発活動を奨励していくとの観点をもって適切な評価をすることで、研究開発活動の効率化・活性化を図り、より優れた研究開発成果の獲得、優れた研究者の養成を推進し、社会・経済への還元を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすことに重点を置く。

2. 原子力試験研究における事後評価の観点

ネガティブチェックよりもその後のフォローアップに主眼を置き、研究者の研究意欲の向上を図るとともに、研究成果を外に向かって積極的に発信することができるよう、原子力試験研究にふさわしい文化の形成を強く意識した評価を実施する。特に、今回の評価においては、以下の観点に留意した評価を行う。

- (1) 事前・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、研究内容の適正な評価を実施
- (2) 研究成果の原子力分野や他分野の学会、学会誌等への積極的発表の呼びかけ
- (3) 原子力試験研究の成果として社会に向かってアピールすべき成果の指摘を行うとともに、インターネット等を通じて、国民に対してわかりやすく成果を発信することを推奨
- (4) 実用化、産業利用、新産業の創出につながる成果に対するフォローアップの方策の助言を行うとともに、新たな研究の展開が見込まれる成果については、積極的にこれを奨励する。

総合評価については、事前・中間評価と同様にABCの3段階評価とする。

A：当初の計画以上の優れた成果が得られた。

B：ほぼ当初の計画通りの成果が得られた。

C：当初の計画以下の成果しか得られなかった。

但し、ABCの評価よりも前記の指導的コメントの充実に主眼を置く。

各分野における研究評価の実施状況について

1. 生体・環境影響基盤技術分野

今回は平成15年度で研究期間が終了した先端的基盤研究13件と、総合研究（クロスオーバー研究）12件、（このうち7件は「放射線障害修復機構の解析による生体機能解明研究」を構成し、他の5件は「放射性核種の土壌生態圏における動的解析モデルの開発」を構成した）、合計25件について二日間にわたり事後評価のためのヒアリングを行った。

結果は、先端的基盤研究では、A評価－5、B評価－7、C評価－1であった。また、クロスオーバー研究のうち、「放射線障害修復機構の解析による生体機能解明研究」を構成した7件は、A－5、B－1、C－1、となったが、「放射性核種の土壌生態圏における動的解析モデルの開発」の5件はいずれもA評価となった。

先端的基盤研究では、HST-1/FGF-4 遺伝子産物が幹細胞のアポトーシス抑制を介して急性放射線障害を防護する機構を明らかにした「後1」、¹⁻¹²⁵シード線源を使った組織内照射による前立腺がん放射線治療法を全国レベルで普及する上で中心的役割を果たした「後4」、放射性同位元素を有効に利用して昆虫集団の同定法を開発した「後10」、エネルギー応答特性が人体組織のそれと同等な熱蛍光シートを開発し局所被曝線量評価に関わる基礎を作った「後12」等の研究成果が高い評価を受けた。

一方、研究発足当初から3年間研究を担当した主研究担当者の異動に際し、後任担当者への引き継ぎが円滑に行われなかったが為に研究の進捗が著しく停滞し、成果が得られなかった課題があった（「後9」）。今回のヒアリングでは、研究期間の途中で主研究担当者が異動したケースが3件あり、そのような場合の研究継続の可否について（当試験研究費の性格をふまえて）検討する仕組みの必要性を指摘しておきたい。なお、そのような困難な状況で研究を引き継いだにもかかわらず、一定の成果を挙げた課題があったことも併記しておく（「後20」－B、「後25」－A）。

「放射線障害修復機構の解析による生体機能解明研究」では、ほぼ順調に研究成果があがったが、C評価とせざるを得ない研究課題もあった。

一方、「放射性核種の土壌生態圏における動的解析モデルの開発」では、全課題をA評価とした。環境へ放出された放射性核種の土壌への移行に関するフィールド調査研究とそれを解析するモデルの開発、三宅島における火山性ガスの拡散や黄砂飛来をシミュレート可能な「狭域」および「広域」移流拡散モデルの開発、放射性核種以外の環境（汚染）物質の動態解析に応用可能な動的挙動予測コード Migration of Ground Additions (略称 MOGRA)の開発等、環境放射線（能）生態学というある意味では「特

殊」な分野から得られた成果が、環境「一般」にも通用することを立証した成果が得られた。

今回の当分野での事後評価のためのヒアリングから提起された重要な問題点として、2点を記しておきたい：先述の「主研究担当者の異動にともなう研究継続の可否」と、従来から行ってきた、研究担当者が所属する機関による「内部評価」の「存続の可否」である。後者については、今回、「内部評価」による「総合評価結果」と、検討会が行った「総合評価結果」は各課題についてほぼ一致を見たが、両者で著しい齟齬をきたした1ケースがあった。これは、当検討会が初めて経験した齟齬である。慎重に対応する必要がある。

2. 物質・材料基盤技術分野

本分野については、平成16年12月1日及び2日の二日間にわたって21終了課題について、11名のWG委員が出席してヒアリングを行い、調査票および関連資料をもとに総合的に事後評価した。

1) 評価に際して重点を置いた点

評価に当たっては、「原子力試験研究の事後評価の基本方針及び観点について」の内容を基本方針とし、研究目的・目標、研究計画と具体的な進め方、得られた成果とその公表状況等をもとに、研究成果のフォローアップと社会へのアピールの奨励等に留意して、総合的に評価した。

2) 評価結果概要

先端的基盤研究の8課題において、2件をA評価、5件をB評価、1件をC評価とした。核融合炉の超強磁場化のための要素技術の開発に関する研究は、急熱急冷法で作製したNb₃Al超伝導線材を実用化するためにコイルとしての長尺均一特性を実証し金属系超伝導コイルとして世界最高の磁場発生に成功しており、A評価とした。極限粒子場における材料の非平衡過程の計測評価と利用に関する研究は、重イオンビームと大出力パルスレーザーの絶縁体試料への同時照射にのみ誘起される現象を見だしナノ粒子析出などを制御できる可能性を示しており、A評価とした。これらの研究においては論文発表や特許等の成果公表も十分に行われている。

自由電子レーザーの先端技術に関する研究は、真空紫外自由電子レーザー発振に成功するなど十分な成果が得られているが、原子力試験研究としての今後の利用を促す意味でB評価とした。水素透過製用合金膜の高度化と総合特性評価に関する研究、光変換型半導体放射線検出器の開発に関する研究、核融合用高磁界超伝導マグネットの応力緩和技術に関する研究、水素同位体混合系に対する水素吸蔵材料の特性に関する

研究については、それぞれ特色ある成果が得られており、原子力試験研究として実用化まで繋げることを踏まえればよかったということでB評価とした。C評価としたRIを利用したペニングトラップ型パルス陽電子源を用いた金属材料分析に関する研究については、測定システムの構築まではこぎつけているが目的とする金属材料分析への応用や成果の取りまとめが不十分と判断した。

クロスオーバー研究では以下のように4つのテーマに関して13件の研究が行われた。陽電子ビーム利用技術に関する高品位電子ビームの高度化および応用研究のテーマについては、4件の課題研究のうち2件をA評価とし2件をB評価とした。陽電子ビームによる材料極限物性研究のための先端技術開発に関しては反射高速陽電子線回析 (RHEPD) の高度化によりSi (111) 表面の分数次回析点に世界で初めて成功するなどの顕著な成果が得られておりA評価とした。超低速短パルス陽電子ビームによる表層物性評価法の研究では、高品質・高強度の低速短パルスビームの発生と制御によりナノ領域の誘電率に關係する表面構造の測定に成功するなど十分な成果が得られておりA評価とした。B評価とした、AVFサイクロトロンによる偏極陽電子ビームの発生とその利用技術の開発に関する研究、および陽電子ビーム掃引法による分析評価技術の開発に関する研究においてもそれぞれ成果が得られている。以上のクロスオーバー研究において陽電子を用いる研究のコンソーシアムを立ち上げるなど原子力試験研究としての特色をいかした活動にも結びついている。

クロスオーバー研究のマルチレーザーの製造技術の高度化および利用研究テーマについては、3課題の研究が行われ1件をA評価、2件をB評価とした。マルチレーザー自動分離装置の開発及び新規計測手法への利用研究については、ガスジェット方式多重ターゲット型短寿命放射性核種製造装置を完成させるなど今後の応用研究の発展に期待がもてることからA評価とした。B評価とした、自動化分離装置の開発、およびマルチレーザーの製造技術の高度化と先端科学技術への応用を目指した基礎研究についても成果が得られている。

クロスオーバー研究テーマのアト秒パルスレーザー技術の開発および利用研究に関しては2件の課題研究が行われ、アト秒パルスの実現には至らなかったが、アト秒パルスレーザーの発生と計測に関する研究および単一サイクルパルスの発生に関する研究において関連技術の成果が得られており、ともにB評価とした。

クロスオーバー研究テーマの原子力用複合環境用材料の評価に関する研究については、4件の課題研究のうち2件をA評価、2件をB評価とした。金属系複合材料の最適化と複合環境適応性に関する研究については、再処理用耐硝酸性材料や革新的軽水炉被覆管の候補材と複合化法の開発や材料特性データ整備が進められるなど十分な成果が得られておりA評価とした。表面および界面の反応と欠陥生成過程研究の高分解能解析については、超高速分光技術によりイオン照射下での時間分解反射率その場測定法の開発に成功するなど優れた成果を挙げておりA評価とした。B評価とした、セラミックス系複合材料の複合環境適用性に関する研究、マルチコンポジットマテリアルの最適化と構造特性評価の研究では、それぞれ成果が得られているが、原子力環境

での適用性の議論などより一層の交流が進めばなお良かったと考えられる。

3. 知的基盤技術分野

本分野については、平成16年11月15日に7終了課題について、6名のWG委員が出席してヒアリングを行い、調査票および関連資料をもとに総合的に事後評価した。

1) 評価に際して重点を置いた点

知的基盤技術分野においては、シミュレーション、ロボット、知識ベースなどの情報科学技術を活用しているかどうか、および原子力の基盤技術という方向性をもっているかどうかを中心に評価した。今回の課題は、「人間共存型プラントのための知能化技術の開発」のクロスオーバー研究が3件（後47、後48、後49）、「計算科学的手法による原子力施設における物質挙動に関する研究」のクロスオーバー研究が4件（後50、後51、後52、後53）であった。前者においては原子力プラントの安全性・信頼性向上のための、劣化予測、保全情報場技術、ヒューマンエラー分析が中心課題であり、工学の諸分野で開発された技術を総合して、原子力分野に役立つ技術を構築できたかを評価した。後者では、マルチスケール連成シミュレーション技術を原子力分野にどう役立てていこうとしているかを評価した。

2) 評価結果概要

「人間共存型プラントのための知能化技術の開発」においては、A-1件、B-2件となった。「後47」は、原子力プラントのライフサイクル適応保全システムとして劣化予測、機器診断、環境適応ロボット、ライフサイクルシミュレーションなどを目指したものであるが、それぞれの要素技術においては多くの成果を上げ、論文、特許も多く創出しているが、原子力システムとしての実用化の観点で不足していることからBの評価とした。「後48」は、時空間上に分散した原子力プラントの膨大な点検情報を、知識ベースの技術により集積し提示するシステムを構築したもので、原子力での適用までには若干の距離があるものの、実用化に向けての展開が評価され、Aとなった。「後49」は原子力プラントの運転情報を、ロボット・エージェント技術により収集し、提示を行う技術を構築しようとするものであり、技術の一般的な開発では成果が見られるが、ヒューマンエラー分析の対象として船舶の運航問題を設定するなど、原子力研究としての位置づけが希薄であることからB評価となった。なお、3件の研究全体について、相互の研究交流や関係研究者との交流などクロスオーバー性については十分配慮されていたと考えられる。

「計算科学的手法による原子力施設における物質挙動に関する研究」においては、A-3件、B-1件となった。「後50」は、ミクロ・マクロレベルの計算科学的手法により照射下での材料挙動の研究を行ったものであり、両階層間の連成の方法論は

未完成であるものの、多くの論文発表、学会発表を行っている点が評価され、A評価となった。「後51」は、原子力機器において重要な熱流動と固体熱弾塑性の連成シミュレーションにより、事故を予測する技術を構築しようとするものである。有用なシミュレーションソフトや可視化ソフトを開発し広く一般に利用可能としたことなどは評価されるが、初期の目標である固体と流体の連成にまだ不十分なところもありB評価となった。「後52」は、照射によるボイドが発生した微細組織のシミュレーション技術を開発し、変形や破壊を予測しようとするものであり、照射欠陥と転移との相互作用に計算科学的アプローチの有効性を示した点を評価し、A評価とした。「後53」は、マルチスケールシミュレーションのための計算技術、特にグリッド技術を開発したもので、大規模物質挙動の古典・量子連成シミュレーションに日米にまたがるグリッド計算の実用性を示したこと、およびその技術の国際的標準化に尽力している点が評価され、Aとなった。これら4課題のクロスオーバー研究としての位置づけについては、種々の研究交流が行われていることは評価できるが、原子力のクロスオーバーとしては十分とは言えない。

全体としてAが4件、Bが3件となったが、要素技術としてはそれなりの進展が見られるものの、原子力基盤技術としての方向性が明らかでないものがいくつか見られた。当分野では事前評価においてもこの観点を重視しているが、このため応募に際し評価が厳しいとして敬遠されている傾向が見られる。今後の課題であろう。

4. 防災・安全基盤技術分野

本分野については、平成16年11月26日に2終了課題について、6名のWG委員が出席してヒアリングを行うとともに、欠席した委員からの書面によるコメントを考慮し調査票および関連資料をもとに事後評価した。

1) 評価に際して重点を置いた点

評価に当たっては、「原子力試験研究の事後評価の基本方針及び観点について」の内容を基本方針とし、研究内容の適正な評価、これまでの評価結果及び研究成果のフォローアップや社会へのアピールの奨励等に留意して、総合的に評価した。

2) 評価結果概要

2課題の評価結果はA及びBであった。

A評価となった「後54」は原子力施設の消防防災技術の進歩を図るため、アルカリ金属類の消火に関する安全性確保と、被災者の救出活動を行うロボットシステムの要素技術開発の2項目を実施している。前者ではナトリウム消化残渣が再発火する可

能性および粉末消化剤に含まれる水分が発火抑制機能に寄与していることを明らかにし、また、後者では、相互位置認識システムや追従システムの開発により複数の小型ロボットを組み合わせて、横1.5m、高さ0.5mの防護壁を構成することを可能にするとともに、要救助者の姿勢を認識し、42Kgf程度の負荷を牽引できる技術を開発した。これらの研究成果はやや試験的な面もあるが、原子力施設の事故の被害軽減に直接役立つ要素技術であり、特にロボット技術に関しては、実用化により各種防災分野への応用が期待される。

「後55」は、確率論的安全評価の一環として、地震等により誘起される同時多発火災リスクの評価法の確立を目指し、地震時機器損傷および火災進展解析コードを開発するとともに、実プラントに近い条件における火災実験により各種データを取得して火災進展コードを検証し、同時多発火災リスク評価手法を提案した。本手法は原子力以外の各種の火災リスクにも適用可能な有用な成果であるが、実プラントにおける検証を残していることなどからB評価とした。今後は、地震による損傷と火災による損傷を分けて示すなど評価法の改良を進めるとともに、原子力事業者や関係機関、メーカーとの一層の連携、交流により本評価手法の実プラントへの適用を期待したい。

A 評価課題の研究概要について

＜生体・環境影響基盤技術分野＞

後 1 サイトカイン遺伝子の発現制御による放射線障害の防護と治療（国立がんセンター）

原子力の有効かつ安全な利用は産業・経済の発展のみならず、医学の治療・診断の分野においても極めて重要な課題である。しかし、医療分野での原子力の有効利用に関して問題となるのは放射線によって生じる様々な副作用である。従って、がんなどの悪性新生物に対する有効な放射線治療の実施に際しては、放射線障害に対する予防・治療法の確立が強く望まれている。我々はこの人体に対する放射線障害を予防する可能性のある因子として、HST-1/FGF-4 というサイトカイン（細胞が産生する蛋白で、それに対するレセプターを持つ細胞に働き、細胞の増殖・分化・機能発現を行うもの）の働きに注目した。この遺伝子は線維芽細胞増殖因子の一つであり、血管新生作用などの様々な作用を有するサイトカインであり、特に注目すべき作用は、抗癌剤による骨髄のダメージや致死量の放射線障害を予防・治療するのに有効な点である。本研究の特色は世界に先駆けて HST-1/FGF-4 の生理活性機能と細胞障害防御のメカニズムを解明したことにあり、放射線障害の予防・治療薬として HST-1/FGF-4 を開発するための基礎研究に有用な情報を得ることができた。

後 4 新しい小線源による前立腺癌の放射線治療に関する臨床的研究（独立行政法人国立病院機構東京医療センター）

近年急速に増加している前立腺癌に対する手術やホルモン治療は、勃起障害を生じる問題点を抱えている。合併症を少なくし、患者の社会生活の質を高く維持できる小線源治療が欧米では広く普及している。これは、ヨウ素 125 (I-125) を経直腸超音波ガイド下に挿入し、入院治療期間が 2, 3 日という理想的な治療法である。日本では I-125 の導入が遅れ、我々は代替として一时装着であるイリジウム 192 (Ir-192) ワイヤ線源を用いる治療技術を開発し、シード治療を日本に導入する環境の整備を課題とした。1997 年 12 月から 2003 年 2 月までに

Ir-192 低線量率小線源治療を 143 名の前立腺癌患者に施行した。症例を積み重ねながら治療の問題点を検討した。技術的工夫を随時導入し、線量分布を評価し、その改善成果を明らかにした。同時に小線源治療単独の利点欠点を認識し、外照射併用の利点を理解した。また、実験的に I-125 シードの周辺への被曝はきわめて微小であることを証明し、シード線源の安全管理に関するガイドラインの作成に取り組んだ。Ir-192 組織内照射法を確立したが、患者の負担や医療者被曝が問題であり、I-125 シード線源の日本への導入は必須と考え、推進活動を行った。結果的に平成 15 年春に I-125 シード線源が日本でも許可され、9 月より新しい線源による治療を国内で初めて当院で開始した。今後、安全なシード治療が国内に普及することが期待される。

後5 重症外傷合併を含む放射能汚染・放射線被曝患者への体系的救急医療体制の研究—迅速かつ汚染拡大防止を目標とした安全な緊急搬送法を中心に（独立行政法人国立病院機構災害医療センター）

原子力エネルギー利用をする上で、災害発生を想定して医療対応を整備することは、欠くべからざる分野である。本研究では、1) 重い外傷を負った多数の患者が発生し、更に 2) 放射能(放射性物質)汚染・放射線の被ばくも伴ったという極めて困難な状況で患者への対応、特に緊急/救急医療を行いつつ、どう搬送するべきかを研究した。

その結果、大きく①技術的側面(tactics・戦術面)と同時に、②大きな視点(戦略・strategy・マクロ、長期的の視点、社会科学的側面)も重要であることが明らかとなり、より具体的に説明すると重要度の高い 10 項目と 5 項目の補足項目を提言することができた。

一部の抜粋したものであるが、示すと、例えば、

- 常日ごろの医療施設での検知器を整備しよう、
- 緊急医療と放射性物質(放射能)汚染時の汚染の除去(除染)を同時にできるようにしよう、
- 医療施設と放射線管理要員(放管員)との協力体制を確立しよう、
- 患者を搬送・治療・対応する時は導線・動線(患者の流れ)を一方向(一方通行)としよう、
- 医療施設・事業所・行政と地域・社会・住民も含め、信頼感を持った情報の伝達体制を作ろう、
- 医療施設でも原子力災害用の専門的なマニュアルが必要、

○原子力災害訓練時は関係する部門と幅広く(時に県境を越え)呼びかけを行おう、などがある。

本研究をベースに、今後検証することにより全国的なレベルアップが可能となると考えられる。

後 10 放射標識 DNA を利用した昆虫集団の同定法の開発 (独立行政法人農業生物資源研究所)

近年、昆虫の種内変異の解析の重要性が指摘されている。それは外見から識別困難な集団の間にも、産業的に利用可能な有用形質や農作物に対する加害能力などに劇的な違いがある場合があるからである。また良好な自然環境を示す生物多様性の維持や新たな昆虫種が出現する機構を解明するうえでも種内変異の解明は不可欠である。本課題では、放射標識 DNA を利用することで、様々な分野の研究者が利用できる正確かつ簡便な昆虫集団の検出と同定法の確立を試みた。具体的には、幅広い分類群に所属するさまざまな昆虫集団の収集、ゲノム DNA ライブラリーの作成、解析に利用可能な DNA の単離、それらの構造と進化特性の解明などを行った。これらの結果にもとづき、カイコや捕食性天敵などの有用昆虫、ミバエ、アザミウマ、コナジラミ、ウンカおよびコガネムシ類他の重要農業害虫の集団同定法を開発した。また研究の過程において、これまでに知られていない多数の新種や新亜種の発見、ミトコンドリア DNA の全ゲノムの解明、分類体系の再構築などの副次的な成果も得られた。本研究で得られた成果は様々な実用的な目的に活用されつつある。特に国際的な植物検疫の現場で利用できるミバエ類の簡易分類法については、広報誌およびインターネット等を通じて幅広く公表しているところである。

※ゲノム DNA ライブラリー：単一の個体や細胞などから抽出した全 DNA を適当な大きさに切断し、大腸菌や酵母細胞などの DNA 等に組み込んだもので、人為的操作によって容易に増殖できる組換え DNA のセット。

後 12 放射線源の多様化に応じた局所被曝線量計測に係る先端技術の開発 (独立行政法人海上技術安全研究所)

加速器施設の増加や放射線の医学利用の多様化に伴い局所被曝の機会が増加している。局所被曝線量の測定は、従来の一点型の被曝線量計では困難であり、

簡便かつ高精度で局所被曝線量を測定できる線量計システムの開発が必要とされている。本研究では、人体組織と等価なエネルギー応答特性を持ち、局所被曝線量を2次元で評価できる薄シート型人体組織等価線量計システムの開発を実施した。

高感度で人体組織等価のエネルギー応答特性を持つ線量計素子として、Mgを付活剤として添加したフッ化リチウム熱蛍光体 NTL-250 (LiF:Mg, Cu, P)を開発した。開発した蛍光体を用いて、2次元計測のための薄シート型の素子(以下シート素子)を製作した。シート成形のためのバインダー材として、NTL-250のアニーリング温度、人体組織等価性、波長透過性等を考慮して、テフロンとエチレンの共重合体である低融点テフロンETFEを選定した。これらにより、シートサイズが最大で20 cm×20cm、厚さが0.2mmのシート素子の開発に成功した。熱蛍光読取り装置として、光学系とデータ処理装置の組み合わせにより、線量の二次元イメージングを可能する装置を試作した。

線量計システムの性能評価として、まず、10~150 keVの単色放射光及び⁶⁰Co線源を用いてシート素子のエネルギー応答特性を評価したところ、人体軟組織に対するエネルギー応答特性と良好な一致を示すことが確認できた。この特性は、従来用いられているBaSO₄を用いたシート型線量計素子と比較して非常に優れているといえるものである。さらに、放射光及び⁶⁰Co線源を用い、局所被曝の条件に暴露して線量分布評価を行った。その結果、線量評価に十分な空間分解能を有していることが確認され、二次元イメージングが可能であることが明らかになった。

本研究の成果は、原子力施設等での線量評価のみならず、CT、PET、永久刺入治療などの医療分野においても活用が期待されるものである。

後14 シミュレーション計算によるDNA損傷機構の研究(日本原子力研究所)

放射線により生じたDNA損傷の中でうまく修復されないものが生体影響を引き起こすと考えられており、DNAの損傷・修復機構は放射線の影響を解析するうえで基本的な情報となる。放射線によるDNAの損傷・修復はごく短時間に微小領域で起きる現象であり、実験により詳細な観察を行うことは難しい。本研究では、シミュレーション計算を用いてDNAの損傷・修復過程の分子レベルのメカニズムを解明することを目的とした。

DNA損傷過程の研究では、モンテカルロ法を利用して損傷が生じるまでの物理・化学過程の詳細なシミュレーションを行った。この5年間には、基本的な

放射線である電子及び光子が、単純な構造を持つプラスミド DNA の水溶液に入射した場合を想定し、放射線の種類・エネルギーと鎖切断の収率との関係を調べた。電子については、DNA の鎖が片方切れる 1 本鎖切断 (SSB) と両方切れる 2 本鎖切断 (DSB) は反対のエネルギー依存性を示し、1 keV あたりで SSB は最小に、DSB は最大になることが分かった。光子についても、数 keV 以下の低エネルギーで、生物影響上重要と考えられる DSB が高エネルギーに比べて高い頻度で生成されること、わずかなエネルギーで大きな収率の変化があることが確認された。これらのシミュレーションは、同じ条件で行った実験結果と良く一致した。

DNA 修復過程の研究では、DNA 損傷を修復する酵素が、DNA 上に生じた損傷をどのように見つけて結合し修復を開始するのかを明らかにするために、分子動力学計算を用いたシミュレーションを行った。3 種類の代表的な塩基損傷 (8-オキシグアニン、チミングリコール、チミンダイマー) とそれぞれの修復酵素との組合せを考えて行ったシミュレーションにより、DNA 上に損傷ができると DNA の立体構造及び静電エネルギーの変化が起き、この変化を修復酵素が認識して修復を開始することが明らかになった。

これまでの研究によりシミュレーションの有効性が確認されたため、現在、モデルと条件をさらに発展させた研究を進めている。

後 15 放射線障害からの回復を促進する遺伝子群の機能解析 (日本原子力研究所)

放射線抵抗性細菌 (*Deinococcus radiodurans*) は、大腸菌の 100 倍、ヒトの細胞の 1000 倍以上放射線に強く、この耐性は効率的かつ正確な DNA 修復能に大きく依存している。本研究の目的は、当該細菌の DNA 修復遺伝子の機能解析を中心として、遺伝子産物間の相互作用及び遺伝子発現の制御機構を明らかにすることによって、当該細菌の高い DNA 修復能がどのような機構によって起こるのかその分子機構を解明し、放射線損傷修復という重要な生体機能の解明に資することである。

本研究では、当該細菌の放射線誘発 DNA 2 本鎖切断の効率的な修復に、組換え蛋白質 RecA が中心的役割を果たす DNA 組換え修復機構が働いていること、また DNA 組換え修復とは別に、新規蛋白質 PprA が中心的役割を果たす DNA 末端結合修復機構が存在し、放射線耐性に大きく寄与していることを示した。さらに、RecA 及び PprA 蛋白質の放射線照射後の誘導が、新規制御因子 PprI によって制御されていることを明らかにした。

本研究で発見した PprA 蛋白質の DNA 鎖切断部位認識能及び DNA 末端結合修復

促進活性を利用した応用研究を行い、PprA 蛋白質が遺伝子工学及び放射線生物影響評価の分野において有用なツールとして使用できることを示した。さらに技術開発を進めることによって、放射線障害回復促進系の実現が期待される。

後 1 6 DNA 障害の修復と遺伝的影響に関する生体機能の解明(独立行政法人理化学研究所)

細胞は、放射線による DNA 損傷を出来るかぎり修復し、突然変異頻度を低く保つための様々な防御機構を備えている。この防御機構で重要な役割を果たしている”チェックポイント機構”を分子レベルで明らかにするとともに、低線量領域での遺伝的影響を染色体異常として検出することを試みた。

哺乳類細胞に対する電離放射線照射による DNA 損傷は二本鎖切断 (DSB) が主で、紫外線照射による DNA 塩基修飾や DNA 複製阻害剤処理による DNA 複製停止の場合とは、質的・量的に異なるチェックポイント応答機構を示した。また、電離放射線照射により誘発される“ヘテロ接合性の喪失”(LOH)の染色体マッピングを行う新たな遺伝解析法の確立を図り、実際にヒト培養細胞を用いて 10 cGy 程度の低線量でも、DSB が原因となる“放射線に特有な LOH”の誘発を検出することに成功した。さらに、放射線によらず、DNA 複製チェックポイントが正常に機能していないと異常な DSB が誘発され、その修復に癌抑制遺伝子 p53 が関わる可能性も示唆された。

ここで、チェックポイント機構というメカニズムの研究と遺伝的影響を調べた研究が良好なマッチングを示したことにより、基礎研究と応用研究の相互発展を目指した研究に道を拓いた。例えば、開発した LOH 解析法を低線量の照射効果の検出に駆使することで、DSB 修復のメカニズム解明につながる。また、温熱処理等による DSB の生成効率に関する研究をさらに進めることにより、遺伝子治療のような臨床応用への展開が可能となる。

後 1 7 突然変異の誘発を促進する蛋白質の構造と機能に関する研究(国立医薬品食品衛生研究所)

ヒトの細胞が一日に被る DNA 損傷の数は 20,000 あまりと推定されており、これらの傷は放射線を含む環境因子や生体内の DNA 損傷物質(例えば活性酸素)により生ずるものと考えられている。本研究では、DNA 上の傷が突然変異に固定され、あるいは回避される過程を分子レベルで明らかにすることを目的として

いる。今年度は、シトシンの脱アミノ化により生ずるウラシルを、DNA ポリメラーゼ（DNA 複製酵素）が認識する様子を、放射線医学総合研究所と共同し、原子間力顕微鏡を用いて解析した。DNA ポリメラーゼとしては、ヒトの DNA ポリメラーゼ δ と同じグループに属し、ウラシルに結合する好熱古細菌由来の DNA ポリメラーゼ B1 を用いた。DNA ポリメラーゼ B1 のウラシルに対する結合は、DNA 合成の進行中に特に強められ、単量体の DNA ポリメラーゼ B1 が DNA 中のウラシルに結合することを明らかにした。この結果は、DNA ポリメラーゼ自身が DNA 損傷のセンサーとして、突然変異の回避に重要な役割を果たしている可能性を示唆している。今後は、より解像度の高い顕微鏡を用いることにより、損傷認識に関わる蛋白質間の相互作用を明らかにすることが期待される。

後 19 放射線損傷の認識と修復機構の解析とナノレベルでのビジュアル化システムの開発（放射線医学総合研究所）

DNA 損傷および DNA 損傷修復関連蛋白質と損傷 DNA 複合体の可視化して解析するシステムを開発して、放射線に強い細菌（ディノコッカス・ラジオデュランス）の DNA 損傷の修復を促進する蛋白質（PprA）が DNA 切断端に結合している状態を原子間力顕微鏡（AFM）で可視化することに成功した。また、DNA 損傷（ウラシル化）を認識する DNA ポリメラーゼ B1 と損傷 DNA の結合形状を AFM で可視化し、ゲルシフトアッセイでは不明であった結合形状を明らかにした。

ミトコンドリア DNA を除去すると細胞は放射線高感受性となり、それは細胞内ラジカルの除去能が低下するためであること、低線量と中高線量では DNA 修復に機能する放射線応答遺伝子の誘導系が異なること、高線量放射線による奇形誘発を低下させる低線量の前照射の線量とこの適応応答の誘発には線量率効果があること、などを発見した。また、放射線応答遺伝子を効率にしかも再現性良く分離できる方法を考案した。

DNA 切断端では修復蛋白質が選択的に凝集化することを利用した修復蛋白質検出法を開発し、特許を出願した。

被ばくした DNA 鎖がラジカルで攻撃された時、特定部位にラジカルが移動してその部位に切断が起き易い理由をコンピュータシミュレーションで分子動力学的に明らかにした。

後 21 放射性核種の土壌生態圏における移行および動的解析モデルに関する研究（放射線医学総合研究所）

環境中に放出された放射性核種の移行挙動を評価することは、重要な課題である。環境中での放射性核種の挙動は、その存在形態に大きく影響される。本研究では、重要な放射性核種の内、特に環境（土壌生態圏）中に放出されてから時間とともにその存在形態が異なる核種を対象とし、特に、土壌中における核種の存在形態変化の解明とその変化を考慮したモデル構築を行ったものである。

すなわち、グローバルフォールアウトのデータ等の解析および室内実験により、これら核種の土壌中での存在形態の変化（エージング効果）のデータを蓄積し、大気および土壌から農作物等への取り込みのモデル開発を行った。開発したエージング効果を記述したモデルにより、事故後から中期における被曝線量のより精確な予測およびその低減化評価が可能である。また、動的移行モデル開発のため、我が国における環境移行パラメータの収集・整備を行った。

本研究において、Tc（テクネチウム）や Re（レニウム）等の超微量元素の高度な分析技術の開発を行った。Re は地球上で存在度が低い元素であり、岩石中には 1ppb 以下、海水では数 ppt である。これまで、海水や隕石に関しては幾つか報告があるが、土壌や植物はほとんど分析されていない。我々は、開発した分析法により岩石、土壌、および植物など、多くの環境試料中の濃度を定量したが、今回得られたデータは、地球科学的にも重要である。

本研究において開発・取得した水田生態系における動的移行モデルおよび移行パラメータは、東南アジア諸国においても適応可能である。さらに、植物による除染は今後の重要な課題であるが、開発した動的解析モデルは、植物による除染効果を詳細に評価できるため、種々の汚染物質についてその植物による除染効果を定量的に検討することが可能である。

後 2 2 放射性核種の土壌生態圏の効果を取り入れた大気環境影響に関する研究(気象研究所)

原子力施設における放射性物質の漏洩事故など、緊急事態に際し、避難・防護等の適切な対応策を実施するためには、対策の基礎資料となる放射性核種の時空間的分布を精度良く迅速に評価予測することが必要である。このため、気象研究所では、放射性核種の大気中での拡散や再飛散を、広域（地球規模）および狭域（数百 km～数十 km）スケールでの高精度の予測モデルを開発するとともに、その精度検証のために、大気中に浮遊する核種の地表面への降下量

の観測を行った。

本研究によって開発された狭域移流拡散モデル（空間分解能 数百m～1km）を使用することによって、大気中に放出された放射性物質の移流拡散を評価するために重要となる風系を詳細に再現することができる。さらに、放射性物質の地表面からの飛散過程をも含めることによって、原子力施設周辺における移流拡散のシミュレーションをおこなうことが可能になった。また、広域移流拡散モデル（空間分解能 2.8°）では、観測値と予測値との比較によって妥当性を確認し、地球規模の放射性核種の輸送をシミュレーションすることが可能となった。

後 2 3 地表生態圏における C-14 等長半減期放射性核種の移行に関する研究 （日本原子力研究所）

本研究は、人間の生活環境である地表生態圏において C-14 等の長半減期放射性核種の移行・循環過程を明らかにし、陸域挙動解析予測モデルを開発・検証・高度化するものである。特記すべき成果として、時間で変動する移行挙動予測解析ができる汎用動的挙動予測コード MOGRA を開発した。MOGRA は汎用コードであり、パーソナルコンピュータを用い GUI*により容易にモデルが作成でき、種々の核種や重金属への対応等の汎用性、拡張性に優れている。公開したので今後、MOGRA を用いた種々のモデル開発が期待できる。大気中放出 H-3 については、予想される化学形 (HTO, HT) につき動的挙動解析予測モデル ETDOSE を開発し、IAEA 主催の生態圏核種移行モデル検証プログラム BIOMASS に参加しその精度が十分であることを確認した。

H-3、C-14 の環境挙動解析のため、大気中に存在するそれらを化学形別に同時に採取捕集できるサンプラーを開発し、これらのサンプラーを用いた H-3、C-14 フラックスの簡便な測定手法を考案、森林内における環境動態の測定、解析を行った。さらに、H-3 の代替とし重水素を用いてビニールハウス内で稲等の植物への移行実験を行い、水田における挙動に関し MOGRA を用いた H-3、C-14 の挙動モデルを開発した。Pu、Am 等の超ウラン元素、Cs-137、Sr-90 等に関し、チェルノブイル事故炉周辺土壌で存在形態や分布、挙動の違い、雨水による流出成分の解析等を行った。その結果、放射性核種の挙動は、同じ核種であっても土質や、存在形態により異なり、また核種により特徴的な挙動を示すことが判明した。例えば超ウラン元素は土壌中腐食物質との強い親和性を示した。また土壌中微生物の核種移行に及ぼす影響について検討し、不溶性の炭酸ストロンチウム等が可溶化される場合があることがわかった。

*GUI:グラフィカルユーザーインターフェイス;図等でわかりやすく入出力する手法

後24 農業気象が植物の経根吸収に及ぼす影響に関する研究(財団法人環境科学技術研究所)

原子力施設の環境影響評価には立地地域の特性を十分に考慮した環境移行パラメータを用いる必要がある。立地地域の特性として農業気象に着目し、植物の経根吸収に与える影響を明らかにすることを目的として本研究を行った。六ヶ所村には国内初の大型再処理施設が立地されているが、この地域はヤマセとして知られる特異な気象条件の頻発地域である。そこで、様々な気象(温度、光、湿度)を制御できる人工気象室内でイネ等を栽培し、Cs、Sr及び微量元素の経根吸収に及ぼす気象の影響を調査するとともに経根吸収メカニズムに関する基礎的研究を安定元素を用いて行った。以下に成果を述べる。

Csの玄米への移行は温度、湿度の影響を受けなかった。また、Srの移行は高温、低湿度で増加するが、ヤマセ気象の低温、低日照、高湿度条件では逆に低下することが判明した。その他の元素については、高温度でFe、Mn、Mo、Niの葉への移行が増加し、低湿度でFe、Zn、Cuの葉への移行が低下した。また、強光条件ではMn、Cu、Zn、Coの葉への移行が増加した。得られた気象影響のほとんどは、対照の2倍から1/2の範囲内に納まることが確認できた。

Cs及びSrの移行のメカニズム研究の材料としてシロイヌナズナの非放射性Cs及びSrの感受性変異株(耐性変異株)の単離に成功した。これらの変異体の特性解析の結果、Csが葉緑体合成系に関与することが示唆され、植物成長に関する基礎的知見が得られる可能性が出てきた。また、Sr感受性変異体はCaの体内挙動においても著しい変異を持っており、農業上重要なCa挙動研究への異なった視点からのアプローチが出来る可能性が期待される。

後25 複合系における核種移行及び動的解析モデルに関する研究(独立行政法人理化学研究所)

原子力発電所、核燃料サイクル施設および原子力の研究開発等を行う原子力施設において、また、放射性医薬品を用いて医療診断、治療、検査等を行う病院等において、放射性物質が生じる。

本研究では、これら環境中に放出され土壌に蓄積した放射性核種を植物-微生物複合系(ファイトエコシステム)を用いて回収し、環境保全に資することを

目指して、ファイトエコシステムにおける放射性核種の移行メカニズムの解析および応用研究を行い、動的解析モデル構築の基礎データを収集した。すなわち、①マメ科等の植物の根に寄生する根粒微生物を利用した研究では、根粒微生物の特定、根粒微生物の安定性の確認、放射性核種取り込み能向上を目指した遺伝子導入を行った。②植物の共生菌を利用した研究では、放射性核種の取り込みを探索した。③植物の放射性核種取り込みに関与する遺伝子解析を行った。これらの実験データを元に、動的解析モデル（MOGRA）を構築した。

分子生物学的手法を駆使して、さらにデータを集積することにより、MOGRAが確立すれば、土壌の放射性核種汚染による環境影響を直ちに評価し、的確な汚染物質除去作業を行うことができるようになる。

<物質・材料基盤技術分野>

後27 核融合炉の超強磁場化のための要素技術の開発（独立行政法人物質・材料研究機構）

プラズマの安定性を高めるとともに、装置全体をコンパクト化して建設コストを大幅に低減させ、さらに誘導放射能を最小化するために、次世代の磁気封じ込め型核融合炉においてはトロイダル磁場の大幅な向上が要請されている。

本研究では、そのために、強い磁場・電磁力下で優れた超伝導特性を保持できる新超伝導材料の急冷法ニオブ・アルミ線材について、その実用化に不可欠な長尺化、安定化材複合、大電流容量化及びコイル化のための要素技術の開発を線材メーカー、原子力専門研究機関と連携して実施した。長尺前駆体製造技術、長尺急冷処理技術、安定化銅複合技術をそれぞれ確立し、その長尺均一性の確認を兼ね、小コイルを試作して金属系超伝導体として世界最高の磁場発生（22.5 テスラ）に成功した。また、線材断面内部にはじめから銀を安定化材として含む安定化の方法も開発し、この方法で安定化されたニオブ・アルミ素線を多数束ねてステンレス管に挿入した核融合炉用大電流容量模擬導体の試作にも成功した。本研究の結果、急冷法ニオブ・アルミ線材が核融合炉用導体として原理的に有望であることを実証できた。今後、電磁力が巨大になり現在実用されているニオブ・スズ線材では対応不可能な次世代核融合炉で、ニオブ・アルミが有力な候補導体として開発されていくことが期待されている。

後28 極限粒子場における材料の非平衡過程の計測評価と利用に関する研究 (独立行政法人物質・材料研究機構)

核融合炉心近傍においては、中性子、ヘリウムイオンなど高エネルギー・高密度の粒子線のみならず、強力な光子にもさらされることになるが、従来は粒子線の原子はじき出し効果のみに注目され、光子の電子励起効果が軽視されてきた。しかしながら、セラミックや酸化物等の原子力用材料の照射損傷機構を解明するためには、粒子場並びに光子を重畳した極限粒子場の実現と材料への適用が重要になる。本研究では、重イオン粒子線技術と大出力レーザーを重畳した極限粒子場と材料との相互作用について、以下のような結果を得た。

極限粒子場技術の高度化として、重イオンビームのパルス化及びパルスイオンによる時間分解分光測定を行った。パルス重イオンビーム発生に成功し、高速現象の測定が可能となった。銅イオンパルス照射下でその場時間分解測定を行い、石英基板中の銅イオンの荷電状態変化を直接とらえることに成功した。

耐照射性材料の非平衡過程の評価として、イオン・レーザー同時照射効果および欠陥生成率のイオン線量率依存性について調べた。イオン・レーザー順次照射と同時照射を比較すると、同時照射の場合にのみ、電子励起誘起の表面粗さの増加、すなわち表面原子脱離現象や、金属ナノ粒子の析出促進効果が現れることを見出した。また高線量率において、欠陥消滅効果が現れることが分かった。このように粒子線照射過程において電子励起効果の重要性及びその機構を明らかにした。

極限粒子場技術を利用した材料創製として、イオン照射により金属ナノ粒子を形成した。照射する金属イオン種を変化させることにより、金属ナノ粒子の表面プラズモンの共鳴波長を変化させることに成功し、共鳴波長を設計・制御することが出来た。

以上のように、本研究は極限粒子場の高度化を達成し、照射損傷過程における電子励起過程の重要性を明らかにし、さらに材料科学への幅広い応用の可能性を実証した。

後34 陽電子ビームによる材料極限物性研究のための先端技術開発 (日本原子力研究所)

高温や応力下等の極限環境における物質の原子レベルでの構造変化の観察は、新機能材料の創製や材料の劣化機構の解明を行う上で不可欠である。このため本研究では、原子構造変化を極めて敏感に感知する陽電子の特長を活かし、反

射高速陽電子回折 (RHEPD) 技術を高度化して最表面解析法として確立するとともに、高速短パルス陽電子ビームを開発して物質表層・界面構造観察に応用し、その有用性の実証を目指した。

RHEPD 技術の高度化では、静電場輸送陽電子ビーム装置にエネルギー分析器とアインツェルレンズを設置し、エネルギー幅と角度拡がりを低減してコヒーレントビームの品質を向上させることで、水素終端シリコン (Si) 表面の第一ラウエ帯や 7×7 再構成表面からの分数次回折点の観測に世界で初めて成功した。また、全反射領域の RHEPD ロッキング曲線の解析から、これまで平坦と考えられてきた水素終端 Si 表面に三重水素化 Si が存在することや、表面付着原子の結合距離及び熱振幅を明らかにし、物質最表面解析法としての有効性が立証できた。高速短パルス陽電子ビームの開発と応用では、線形加速器の原理を応用して短パルスビーム発生が可能であることを確認するとともに、炭化ケイ素 (SiC) や酸化亜鉛 (ZnO) 等の次世代半導体の原子構造解析に低エネルギー短パルスビームを応用し、SiC/酸化膜界面における中間層の存在の確認をはじめ、イオン注入や熱処理等の素子製作基盤技術の開発上有益な知見を得た。

本研究で開発した RHEPD 等の先端技術の適用により、これまで極めて困難であった物質表面原子の熱振動や高温での表面融解現象の実測、表層ナノ構造の解明が可能となり、表面基礎科学をはじめ、表面への低次元構造やナノ構造形成による新機能材料・素子開発等の広範な分野で新たな展開が期待される。

後 3 6 超低速短パルス陽電子ビームによる表層物性評価法に関する研究 (独立行政法人 産業技術総合研究所)

新規材料の開発において表面近傍の極微構造を詳しく調べることができる革新的な評価法が求められており、格子欠陥等の極微構造に敏感な陽電子は新しい計測プローブ粒子として期待されている。本研究では、電子加速器を用いて高強度で安定な低速短パルス陽電子ビームの発生を実現するとともに、この陽電子ビームをプローブとした物性評価法の開発を行い、高機能材料に適用してその有効性を実証した。

本研究で開発した短パルス陽電子ビームは、試料に入射するエネルギーを変えることによって、入射深さを表面数ナノメートルから数マイクロメートルの範囲で自在に変えることができ、高機能材料で重要な表面近傍や薄膜の構造を評価できる。このビームを用いた陽電子寿命測定法は、材料中の原子レベルからナノレベルの空孔のサイズを知ることができ、イオン照射によって形成される欠陥の評価や半導体 LSI 等で重要な低誘電率絶縁膜の空孔評価などに非常に

有用であることを明らかにした。さらに、陽電子寿命測定法を拡張した寿命・波高2次元測定法や寿命運動量相関測定法により、空孔サイズだけでなく、ナノ空孔の連結・開放性や、空孔表面の状態を調べることを可能にした。

これらの成果を産業界に普及させるため、陽電子ビーム利用材料評価コンソーシアムを設立し、産学官の連携を進めており、今後の展開が期待される。

後38 マルチレーザー自動分離装置の開発及び新規計測手法への利用研究 (独立行政法人理化学研究所)

周期表上の有用元素の多くを同時に供給できるマルチレーザー法は、理化学研究所(理研)が世界に先駆けて確立した独自の技術であり、その利用者は生物学、医学、環境科学、材料物性研究等、多岐に渡る。

本研究では、このマルチレーザー法をさらに展開させることを目的として①マルチレーザー製造技術の高度化、②マルチレーザー自動化学分離装置の開発、および③マルチレーザーのダイナミクスを可視化する複数核種同時ガンマ線イメージング装置(MT-GEI)の開発を行った。その結果、利用形態に合わせた各種のマルチレーザーを製造する技術を構築した。また、理研の確立した化学分離技術を用いて放射線医学総合研究所および物質材料研究機構が開発した自動化学分離装置等を導入し、検討に着手した。これらの検討を重ね、確立することで、短時間かつ最小限の被爆で必要な族、群を含むマルチレーザーを供給できるシステムが構築できる。また、MT-GEIの開発・改良に成功し、それをふまえ、臨床医学、基礎医学用画像診断装置として利用できる汎用型ガンマ線イメージング装置(GREI: MT-GEIの後継機)の開発に着手した。この技術が確立すれば、複数核種同時のダイナミクスの測定や3種以上のRI標識化合物の生体内挙動がモニターでき、各種微量元素の機能解明を進捗し、核医学診断・治療などの革新的進歩をもたらすことが可能になる。また、複数の標識化合物や元素を可視化できるため、細胞内のクロストーク等のミクロな情報伝達系における生理機能を解明することまで可能となる。

後43 金属系MCMの最適化と環境適応性評価(特殊法人 日本原子力研究所)

軽水炉や使用済核燃料再処理機器等の高性能化を図る上では、高温水や硝酸等の腐食性環境側と、核燃料や蒸気等の加熱媒体側との防護壁の役割を果たす燃料被覆管や圧力壁用金属材料の開発が最も重要となる。本研究では、そのよ

うな放射線場・温度傾斜場の複合環境-材料の界面反応が、材料表面に生成する低速電子により励起された酸素や酸化剤の生成に支配されることを見出し、その現象を低速電子励起源を用いた基礎評価試験や理論解析等により明らかにした。併せて、高酸化力の腐食環境条件に対応した新材料技術として、原子炉用ステンレス鋼の課題である粒界型の腐食やき裂が生じにくい超高純度鋼塊の溶製技術や加工熱処理による金属組織制御法を最適化した新仕様のステンレス鋼、Crと共にWやSiを複合添加して耐酸化性と機械的強度を改善したニッケル基合金、及び耐酸化性に優れたニオブ合金等の新材料と、実用化を念頭に、それらの新材料とステンレス鋼等従来材との接合技術を開発した。それらの開発材の環境適応性に関して、放射線作用と熱流束の影響を考慮した γ 線照射場腐食試験や低速電子励起腐食試験等の模擬試験、及び加速器を用いたイオン照射や研究炉照射試験等による材料や接合部の耐照射性評価試験等を実施して、耐食性や耐照射性の改善効果の確認を行い、原子力複合環境特有の腐食現象と、それに対応した防食原理及び実用性の高い新材料技術の基盤を整備した。

後45 表面および界面の反応と欠陥生成過程の高分解能解析（物質・材料研究機構 材料研究所）

原子力環境における欠陥生成や反応の素過程を解明するためには、超高速解析手法による照射初期段階での反応に着目した研究が必要であるが、欠陥による効果を時間領域で直接観測する手法の技術は未確立である。そのため、本研究では1)新しい分析手法として超短パルスレーザを用いた超高速分光技術を損傷の解析に適用すること、および2)照射環境での機械的性質への界面の影響を評価する手法を開発することを目標とした。

その結果、1)イオン照射下での時間分解反射率その場測定手法の開発、2)時間分解反射率測定技術の高度化と照射欠陥の評価法の確立、3)欠陥分布イメージ化手法開発、および4)原子状水素照射下引っ張り試験装置開発と双結晶試験片の機械的性質の環境評価等、多くの材料解析手法を開発に成功した。

超高速欠陥解析法は新たな非破壊欠陥評価法として、加速器等での材料損傷のその場高感度検出等にすぐにも適用可能であり、イメージ化手法は、照射損傷部特定のための高感度・高速モニターに使える汎用性の高い方法に発展できる、等々；研究の成果は原子力研究分野の基盤技術研究に寄与するだけでなく、半導体プロセス技術、高速光通信技術、構造材料開発などの他分野との応用にも可能であり、波及性は高い。物性物理など基礎的学問分野との関連も強く将来性は高いと考えられる。

<知的基盤技術分野>

後48 ロボット群と保全知識ベースの協調によるプラント点検・提示システムの研究開発（独立行政法人 産業技術総合研究所）

原子力プラントの異常の兆候は往々にして緩慢な変化として現れることが多く、その早期発見のためには現在の点検情報だけでは不十分である。そこで、本研究では長年月にわたる点検情報を蓄積することにより、過去の情報との比較や、緩慢な変化の時短提示を可能とする技術を開発し、異常の早期発見を支援することを目指した。

上記目的のためには、画像をはじめ多種多様な点検情報を長期にわたり蓄積する必要があるが、それは空間的・時間的に離散した膨大な情報であるため、情報量の圧縮、情報間の関係の保存と利用、情報の整合性など、解決すべき多くの問題があった。これに対し従来とは異なる、時間軸方向に拡張した仮想空間（以下、これを「仮想環境」という。）に点検情報を蓄積するというアイデアを提言した。つまり、点検情報を仮想環境に正確に位置あわせして蓄積することにより、位置の整合性がとれると同時に、実際の構造物が持つ関係を継承できる。さらに、本来の3次元位置に還元して蓄積するので、空間的・時間的に大きな圧縮効果が期待できる。また提示に関しても、VR（仮想現実）技術として養われてきた多様なビジュアライゼーション（可視化）技術やハードウェア技術が活用できる。

点検情報の仮想環境への蓄積を具体化するために、パイプなどの曲面しかない環境においても点検情報と仮想環境を正確に位置合わせする技術などを開発すると同時に、それら要素技術を統合して環境サーバーとして実装した。環境サーバーは、理研、海技研とのクロスオーバー研究の中核として活用され、3研究所の研究成果を保全情報場技術（保全情報をデジタル化し獲得・維持・提示する技術）として統合し、試験炉の一部のモックアップを対象として共同実験を行った。それにより、環境サーバーおよび保全情報場技術がプラントの異常の早期発見や診断に有用であることを実証できた。

仮想環境への蓄積により時空間に分散した多種の膨大な情報の統合的な蓄積・管理を可能とした環境サーバーは、原子力プラント点検のみならず環境のデジタル化の基盤として波及効果が期待できる。現状の環境サーバーは環境の幾何構造は不変であるとして実装を行ったが、原子力プラントの場合でも定期

点検の前後においては、構造も含めた変化が起こり得る。したがって、幾何構造の変化にも対応できるよう改良することが今後の課題である。これは環境サーバーの適用範囲を大きく広げることにもつながる。

後50 マルチスケールモデリングによる物質・材料挙動の研究（日本原子力研究所）

電子、原子のミクロレベルから工学機器のマクロレベルまで色々なスケールから現象を数値シミュレーションして解析するマルチスケールモデリングの手法を適用して、材料物性分野では、原子炉の経年変化に関連する材料の粒界脆化、き裂の進展、照射硬化現象を明らかにし、熱流動分野では、原子炉内二相流動における実験相関式のシミュレーションによる代替を目指した手法を確立した。

材料物性の研究では、原子炉材料の照射誘起応力腐食割れに関連して、電子レベルから原子間の結合状態を計算出来る第一原理計算手法を用いて、照射により結晶粒界に偏析する微量不純物元素の材料強度に与える影響を評価する手法を確立した。本研究では、特にニッケル粒界を対象に研究を行い、不純物元素が粒界を脆化させる機構とともに強化させる機構についても明らかにした。今回の成果により、粒界脆化に関する計算による材料設計への道を開いた意義は大きいと考える。熱流動の研究では、炉内構造物等の複雑形状流路内の混相流動を経験的手法を用いることなく導出する研究を行った。本研究では、既存の方法では無く、格子ボルツマン法による二相流のシミュレーション手法を開発し、層状二相流から、波状流、液滴流への流動様式の遷移、分散二相流における、気泡、液滴の合体分裂挙動、定常な分散二相流等が特殊なモデルを用いることなく数値シミュレーションでき、実験相関式と良く一致することを示した。本研究の成果により、二相流の経験式をシミュレーションで代替する新たな展開が期待される。

後52 微細組織を考慮した材料特性の計算機シミュレーション（独立行政法人 物質・材料研究機構）

原子炉材料では照射によって生じた原子空孔やヘリウム原子が凝集してボイドや気泡になり、材料の強度や延性を劣化させる。実験が困難な照射環境下での材料の挙動や特性を、計算シミュレーションにより予測する技術の開発・高

度化は重要な課題である。本研究では、原子レベルでの照射欠陥の発生から、欠陥が集積しボイドや気泡へ成長する過程、ボイドや気泡を含む材料の高温変形・破壊特性まで、ミクロからマクロにわたる原子力用材料の挙動に関するシミュレーションを行う計算コードの開発を行った。

照射欠陥の形成初期過程、照射欠陥の動的過程と離合集散過程、照射欠陥を含む材料の特性、照射欠陥と転位の相互作用について、約 100 万原子の大規模シミュレーションが可能な分子動力学法計算コードを開発した。自己格子間原子のダイナミックな特質として、単純な拡散機構の他に soliton 的な一次元運動が実際の金属中で起こり得ることが、本研究の過程で初めて明らかにされた。弾塑性クリープ、き裂進展、破壊力学解析を行う有限要素法コードと、空孔の拡散解析を統合した 3 次元計算コードを開発した。空孔が切欠や析出物、粒界等に凝集し、損傷の生成によって破壊が加速される過程のシミュレーションが可能になった。

本研究で開発したプログラムは、原子力用構造材料でおこる現象、力学特性、寿命の評価に適用することが可能である。更に複雑な材料構造を考慮したプログラムの高度化、ミクロからマクロな現象を統合したシミュレーションの研究を展開している。

後 5 3 高密度マルチスケール計算技術の研究（独立行政法人 産業技術総合研究所）

原子力施設等で用いられる材料の中性子線による脆化や残留応力による材料劣化のメカニズムを解明することは、原子力施設の経年劣化を予測し、適切な処置を施すための指針を与えるために重要である。これらのメカニズムを解明するためには、原子レベルで生じるミクロスケール現象及び原子の集合体としての構造体に対するマクロスケール現象の把握が必要である。このため、ミクロスケールからマクロスケールに到るマルチスケールの計算機シミュレーションを可能とする計算環境及び高密度マルチスケールモデルに関する研究開発を行った。

本研究開発では、クラスタ型計算機システム構築技術とその上でのプログラム並列化技術に基づく高性能計算技術、及び複数モデルを同時に実行するための高密度な演算能力を持つグリッドコンピューティング技術を開発した。特に、地球規模の計算環境を利用するために開発したグリッドミドルウェア Ninf-G は、広域分散環境における計算モデルである遠隔呼出し手続き（RPC：Remote Procedure Call）に基づく手法であり、グリッドコンピューティング技術とし

て世界に普及しつつある。また、本研究で提案したグリッド RPC は、グリッド技術の世界的標準化団体 GGF (Global Grid Forum) において標準化技術として策定されており、成果の一部は国際標準としての展開が図られている。また、高密度マルチスケールモデルのひとつとして、分子動力学ステンシル (MD ステンシル) をグリッド環境上に実装するとともに、並列分子動力学ポータルサイトを開発し、遠隔地から容易にシミュレーションできる環境を構築した。金属材料の照射硬化現象に対し分子動力学法シミュレーションを実施し、マルチスケール計算環境の利便性を検証した。今後は、グリッド環境による計算資源の有効利用が期待され、QM/MM 法など量子力学と古典的な近似計算との融合を目指したシミュレーション研究が期待できる。

※QM/MM 法

量子力学計算と古典力学計算の複合計算手法のことで、基質と相互作用する活性部位近傍は量子科学計算に則り、その周辺は古典的に記述する近似方法であり、化学現象の起こる部位を高精度に取り扱いながらも、酵素のような巨大分子を高速に計算することが可能になる。

<防災・安全基盤技術分野>

後54 原子力施設の消防防災技術に関する研究 (独立行政法人消防研究所)

本研究は、原子力施設災害時等の被害の軽減を図る上で、今後必要となる消防防災の要素技術開発を目的として、(1) 高速増殖炉「もんじゅ」で現実に発生した金属ナトリウム漏洩火災事故に鑑み、金属ナトリウムの燃焼現象の解明と燃焼残さ (燃焼残物質) の再着火の防止、(2) 事故時に負傷者等により避難ができない被災者について、ロボット技術を用いて被ばく者を防護する手法、について研究開発を行った。

(1) の研究においては、燃焼実験装置を用いてナトリウムの燃焼現象を調べ、(a) 窒素でいったん消火したナトリウムの燃焼残さが常温の空気雰囲気中で再燃の危険性があること、(b) 過酸化ナトリウムを含む燃焼生成物が熔融ナトリウムと共存できることなどを明らかにした。

また、消火活動の阻害となる燃焼残さの再着火について、安定化実験、化学分析、温度測定、表面観察などを通じ、着火のメカニズムを解明するとともに、粉末消火剤に含まれる水分量の影響を調べ、1%程度の水分を含むアルカリ金属消火用の粉末消火剤又は炭酸ナトリウム粉末は燃焼残さの再着火を防止する

効果があることを明らかにした。

(2)の研究においては、被ばく防護の三原則（遮へい、距離及び時間）のうち、ロボットでの実現性を考慮し、遮へい（防護壁ロボット）及び距離（被災者牽引ロボット）に着眼して技術開発を進めた。この際、大型のロボットでは操作ミスが被災者に与える影響が大きく、一方、小型のロボットでは十分な能力を付加することが難しいことが想定されるため、多数の小型ロボットからなる”群”の協調制御により、群全体を1名程度で操縦する手法の検討を進めた。

まず、防護壁ロボットシステムにおいては、(a)先頭のロボットの通過した経路をなぞるようにロボットが次々に通過し移動する技術、(b)先頭のロボットの指示を受け、ロボット同士が連結する技術、(c)後方からの送水により展開膨張し防護壁を形成する技術を開発した。

被災者牽引ロボットシステムにおいては、(d)ロボットのカメラで取得した被災者の画像の各関節をマウスでクリックし、被災者の姿勢を認識する方法、(e)得られた姿勢情報から小型のロボットによって自動的に姿勢変換する技術、(f)被災者の下に潜り込むロボット及び被災者を把持して牽引するロボット技術を開発した。

本研究の成果は、今後、実用化に向けた研究開発を行っていくことにより、安全で迅速な救助、消火活動に寄与することが期待される。