

JAERI-Review

2004-012



JP0450520



物質科学研究専門部会評価結果報告書
(平成15年度事後評価)

2004年6月

研究評価委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

物質科学研究専門部会評価結果報告書
(平成 15 年度事後評価)

日本原子力研究所
研究評価委員会

(2004 年 3 月 19 日受理)

研究評価委員会は、「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規程」に基づき、物質科学研究専門部会を設置し、東海研究所の物質科学部における平成 10 年度から平成 14 年度までの研究開発課題の実績について事後評価を実施した。同専門部会は、8 名の外部専門家で構成された。

物質科学研究専門部会は、平成 15 年 10 月から平成 16 年 2 月にかけて、当該部門の研究評価活動を実施した。評価は、事前に提出された評価用資料及び専門部会会合（平成 15 年 11 月 14 日開催）における被評価者の説明に基づき、研究評価委員会によって定められた評価項目、評価の視点、評価の基準に従って行われた。

同専門部会が取りまとめた評価結果報告書は、平成 16 年 3 月 8 日に行われた研究評価委員会会合に提出され、審議された。審議の結果、研究評価委員会は、この評価結果を妥当と判断した。本報告書は、その評価結果である。

Report of the Evaluation by the Ad Hoc Review Committee
on Materials Science Research
(Ex-post Evaluation in Fiscal Year 2003)

Research Evaluation Committee

Japan Atomic Energy Research Institute
Suehiro-cho, Kashiwa-shi, Chiba-ken

(Received March 19, 2004)

The Research Evaluation Committee, which consisted of 13 members from outside of the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), set up an Ad Hoc Review Committee on Materials Science Research in accordance with the "Fundamental Guideline for the Evaluation of Research and Development (R&D) at JAERI" and its subsidiary regulations in order to evaluate the adequacy of the R&D results achieved for five years until Fiscal Year 2002 at Department of Materials Science in Tokai Research Establishment of JAERI. The Ad Hoc Review Committee consisted of eight specialists from outside of JAERI.

The Ad Hoc Review Committee conducted its activities from October 2003 to February 2004. The evaluation was performed on the basis of the materials submitted in advance and of the oral presentations made at the Ad Hoc Review Committee meeting which was held on November 14, 2003, in line with the items, viewpoints, and criteria for the evaluation specified by the Research Evaluation Committee.

The result of the evaluation by the Ad Hoc Review Committee was submitted to the Research Evaluation Committee, and was judged to be appropriate at its meeting held on March 8, 2004.

This report describes the result of the evaluation by the Ad Hoc Review Committee on Materials Science Research.

Keywords: Evaluation of Research and Development, Ex-post Evaluation,
Materials Science Research, Tokai Research Establishment,
Department of Materials Science

目 次

評価の経緯について

平成 15 年度研究評価委員会委員

はじめに	1
総合所見	2
1. 専門部会の目的	6
2. 評価の方法	6
2.1 専門部会の構成	6
2.2 事後評価対象課題	6
2.3 評価のプロセス	7
2.4 評価項目及び評価基準	8
3. 物質科学研究部における研究開発実績の概要	10
3.1 全体概要	10
3.2 研究開発実績	16
4. 評価結果	26
4.1 放射線場物質科学（主要課題領域Ⅰ）	26
4.2 極限物性・新材料科学（主要課題領域Ⅱ）	29
4.3 アクチノイド科学（主要課題領域Ⅲ）	31
4.4 施設開発・運転管理（主要課題領域Ⅳ）	34
4.5 その他の所見	35

Contents

Evaluation Process

FY2003 Evaluation Committee Member List

Introduction	1
Executive Summary	2
1. Purpose of Ad Hoc Review Committee	6
2. Evaluation Method	6
2.1 Organization of the Ad Hoc Review Committee	6
2.2 R&D Programs for Ex-Post Evaluation	6
2.3 Evaluation Process	7
2.4 Items and Criteria for Evaluation	8
3. R&D Results at Department of Materials Science	10
3.1 Summary	10
3.2 R&D Results on Major Programs	16
4. Results of the Evaluation	26
4.1 Materials Science in Radiation Fields (Program I)	26
4.2 Materials Science under Extreme Circumstances and New Material Development (Program II)	29
4.3 Actinides Science (Program III)	31
4.4 R&D and Operation of Tandem Accelerator (Program IV)	34
4.5 Other Evaluation Remarks.....	35

評価の経緯について

研究評価委員会事務局
(企画室 研究評価推進室)

研究評価委員会（委員長：西澤潤一 岩手県立大学長）は、「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」（平成10年4月策定）及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規程」（平成10年4月策定、平成11年4月改正）に基づき、東海研究所の物質科学研究所における平成10年度から平成14年度までの研究開発課題の実績について事後評価を実施するために、「物質科学研究専門部会」を平成15年9月1日に設置した。

物質科学研究専門部会（部会長：森田健治 名城大学理工学部教授）は、8名の外部専門家で構成され、平成15年11月14日に開催された。同専門部会による評価は、研究評価委員会によって定められた評価の方法に従って行われた。同専門部会は評価結果を取りまとめ、平成16年3月8日に「物質科学研究専門部会評価結果報告書」を研究評価委員会委員長に提出した。

研究評価委員会は、平成16年3月8日に第12回研究評価委員会を開催し、同専門部会部会長から「物質科学研究専門部会評価結果報告書」の説明を受け、審議を行った。その結果、研究評価委員会は、同専門部会の評価結果が妥当なものと判断し、研究評価委員会委員長は、同報告書を平成16年3月8日付けにて日本原子力研究所理事長に答申した。

平成 15 年度研究評価委員会委員(13 名)

委 員 長	西澤 潤一	岩手県立大学長
委員長代理	秋山 守	(財) エネルギー総合工学研究所理事長
委 員	秋元 勇巳	三菱マテリアル(株)取締役相談役
	菊田 惺志	(財) 高輝度光科学研究センター理事
	草間 朋子	大分県立看護科学大学長
	小林 敏雄	(財) 日本自動車研究所長
	齊藤 鐵哉	物質・材料研究機構監事
	白土 良一	電気事業連合会原子力開発対策委員会委員長
	代谷 誠治	京都大学原子炉実験所長
	田川 精一	大阪大学産業科学研究所教授
	田中 知	東京大学大学院工学系研究科教授
	本島 修	核融合科学研究所長
	山崎 敏光	東京大学名誉教授

(委員については五十音順)

(平成 15 年 12 月現在)

はじめに

今回の事後評価の対象は、物質科学研究部が平成10年度から平成14年度までに実施した研究開発課題であり、以下の4主要課題領域に関する研究開発の実績である。主要課題領域Ⅰは、核物理・核化学的手法による原子核科学の研究、反応のダイナミックス及び電子状態の研究など高エネルギー照射場における物質の挙動を総合的に捉える研究である。主要課題領域Ⅱは、原子炉環境における物性変化の解明によって新しい原子力システムの開発を可能とする新素材・材料の創製を目指した研究である。主要課題領域Ⅲは、革新的核燃料サイクルの確立を目的とする、アクチノイド化合物の物性研究及び新しいアクチノイド分離法の創造に関する開発研究である。主要課題領域Ⅳは、物質科学研究を支援するタンデム加速器の運転・管理及び高性能化のための技術開発などの業務課題である。

事後評価に当たっては、これら研究開発課題の目的達成度、実施経過、成果の普及・波及効果、並びに、人材育成、将来への研究開発の展開などについて検討した。

評価の具体的な進め方としては、まず、研究開発担当部署から提出された事後評価用資料に基づき、各委員から暫定的所見・質問等を求めて、これを集約した。次いで、専門部会会合を開催し、研究開発担当部署から事後評価用資料及びその補足説明資料の詳細な説明がなされ、これに対する質疑応答が行われた。その後に各委員から最終的な評価所見及び評価点を得て、これを評価結果として集約した。その際、多様な意見は相互に矛盾することがあってもできるだけそのまま収録することとして、報告書案を取りまとめた。さらに、委員全員の報告書案のレビューを踏まえて、本報告書を完成させた。

本専門部会による事後評価の結果が、今後の物質科学研究部の研究開発の展開に役立てられることを願う。

本専門部会の委員各位には、限られた研究評価期間の中で熱意溢れる御協力を賜ったことに対し、ここに深甚なる謝意を表する。

平成16年2月24日
物質科学研究専門部会
部会長 森田 健治

総合所見

物質科学研究部は、平成9年度の原研の組織改編に伴い、平成10年度に、燃料研究部、材料研究部、原子炉工学部の改組により発足し、原子力エネルギー利用の高度化と革新的核燃料サイクルの開発を目標に、高エネルギー照射場における原子核、物質、材料の挙動の解明と、原子核(ミクロ)から材料(マクロ)スケールにわたる物理的・化学的性質、反応特性の解明を土台とする、新物質の創製、耐放射線性・低放射化材料の研究開発とともに、またアクチノイド化合物の構造、相状態、熱力学的性質と電子的状態の解明を土台とする革新的アクチノイド分離法の研究開発を開始した。平成9年8月に決定された「国的研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」に沿って、平成10年7月に実施された原研の研究開発課題に対する研究評価委員会による評価結果を踏まえ、平成11年度から4つの主要課題領域：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳに区分して、Ⅰ：放射線場物質科学(2テーマ)、Ⅱ：極限物性・新材料科学(2テーマ)、Ⅲ：アクチノイド科学(2テーマ)、Ⅳ：施設開発・運転管理(業務テーマ)が、7グループ編成で、平成15年3月末まで実施された。これらの研究開発課題は、いずれも国の原子力長期計画に沿って計画、実施されたものであり、得られた成果は同計画に資すとともに、科学技術の学術的進展に貢献すると期待している。

以下に、上記の各主要課題領域における研究開発の実績に関する評価結果の概要を示す。

(1) 放射線場物質科学(主要課題領域Ⅰ)

本主要課題領域では、高エネルギー照射場における物質の挙動を総合的に捉え、原子核科学と物性研究の境界領域の解明を通して原子力用新材料開発の途を拓くことを目的として、①核物理・核化学的手法による原子核科学の研究を進め(原子核科学研究グループ)、②電磁波と原子分子との相互作用、反応のダイナミックスや電子状態の解析による新材料の創製が図られた(原子分子科学研究グループ)。研究開発の課題は、総体的に当初目標の設定、達成度とともに高いレベルにあると判断される。特にクーロン励起完全核分光法の開発およびその適用による励起核の電磁気的性質や変形の解明、2波長赤外光照射による高効率シリコン同位体濃縮法の開発、さらには、多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析と組み合わせた高性能元素分析法の開発などは、原研のオリジナルの優れた成果であると高く評価される。また加速器駆動炉などの新型炉の設計に必要なデータの整備は、当初計画を達成している。他方、ランタノイド化合物およびクラスターの生成、反応、構造に関する

る研究は、今後の進展を期待する。

(2) 極限物性・新材料科学(主要課題領域Ⅱ)

本主要課題領域では、原子炉環境で材料がおかれる極限的条件での材料物性変化の解析と、耐放射線性・低放射化に優れた材料の要件の解明による、新素材の創製、核融合炉材料の開発および、原子炉材料の照射応力腐食割れ(IASCC)機構の解明による、新しい原子力システムの研究開発やシステムの長期安全運転を可能にする新材料の開発を目的に、①極限物性の解明と新素材の開発の研究(極限物性研究グループ)や、②システムの長期安定運転を可能とする新素材・材料の研究開発(材料照射解析研究グループ)が進められた。原子炉材料の基本的研究が着実に進められ、また超伝導材料や環境半導体など新規の材料開発が果敢に挑戦されて、具体的には、ナノチップ電子錠搭載走査型透過エネルギー分光電子顕微鏡の完成、候補材料としてのフェライト鋼やトリチウム増殖材料の照射解析、先進材料としてのSiC/SiC複合材料の製法開発、イオン照射法によるシリコン表面上での β -SiFe₂薄膜結晶成長の成功など、目標とした成果が着実に得られている。今後、照射後疲労特性研究や高温水中割れ感受性研究など現在稼動中の原子炉に直接係わる材料の開発研究の進展が望まれる。

(3) アクチノイド科学(主要課題領域Ⅲ)

本主要課題領域では、アクチノイド化合物の種々の環境における構造、相状態、熱力学的性質および電子状態等の解明と、溶液中でのアクチノイドと有機配位子との反応機構の解明に基づき、新しいアクチノイド分離法を開発することを目的に、①アクチノイド酸化物、窒化物の相状態、化学ポテンシャル、不定比性等の熱力学的性質の解明(アクチノイド科学研究グループ)と、②溶液化学的再処理法の抽出分離技術の高度化と、オメガ計画における実高レベル放射性廃棄物の4群分離ホット実験の実施、群分離プロセスの改良、群分離データベースの整備、高度分離抽出剤の開発(抽出分離化学研究グループ)が展開された。具体的には、原研でしか出来ない特徴を活かして設定された、個々の重要なテーマが着実に実施され、一連の取得されたデータは、革新的燃料や廃棄物処分技術の開発に役立つだけでなく、学術的に価値が高いと判断され、また重元素溶液系の抽出分離に関連するアクチノイドを分離回収する抽出剤TODGAの開発の成功は特に高く評価され、研究開発課題の目標達成度は極めて高いと評価される。

(4) 施設開発・運転管理（主要課題領域IV）

物質科学研究を支える高エネルギーイオン源としてのタンデム加速器の効率的運転と性能改善を目的として、タンデム加速器の運転、年間スケジュールの立案や協力研究の調整業務を実施するとともに、制御系計算機の老朽化対策、制御機器の数値制御方式のための電源開発、タンデム加速器による希ガスイオン加速用の正イオン源の開発、高圧超純水洗浄法適用による耐高電圧特性の改善等が実施された（加速器管理室）。具体的に実施された加速器の運転管理の業務内容は、年間約200日（約4,600時間）の運転に基づく重イオン照射による原子核科学、物質科学の研究支援、磁場値制御のスイッチング電源の開発・高性能化・省消費電力化、ガス流量制御と希ガス処理用真空系の改良に基づく正イオン源の整備による希ガスイオンの加速の成功等、広範囲に及んでいるだけでなく、目的達成のため種々創意工夫が行われ、さらには、原研の外部機関との協力研究、共同研究の推進への貢献が多大で、高く評価される。このような研究支援の継続には、今後とも管理室全体の不断の努力が期待される。

上述のように、個々の主要課題領域における研究開発課題の目的の達成度は満足すべきレベルにあると判断されるので、研究開発実施における研究の展開と資源活用は、全体として、限られた予算と人的資源や、与えられた条件の下、物質科学研究部内における、あるいは外部との協力・共同研究の積極的な努力と創意工夫により、特に問題なく行われたと評価される。また重点項目への資金の投入のため文科省科学研究補助制度、特別会計予算制度、文科省公募型研究制度等への応募による外部資金の獲得は、高く評価されるが、今後、益々その必要性が大きくなると予測される。

他方、博士研究員の受入数は、各グループの研究の進展状況により異なるが、平均すれば1年に2名弱となり、わが国の中核研究所の基礎研究部門としては、目標値を達成しているとは思えず、今後の拡大を期待したい。また特研生の受入数は、平均3名で、博士研究員より少しばかり多いが、必ずしも十分であるとは思えない。原子力研究に携わる若手研究者の育成の重要性を考えると、原子力研究の中核研究所として人材の育成に一層の努力を望みたい。

研究開発の成果はその大部分が学術論文として公表されていて、発表論文の件数は、全体で平均すると、約2報／年・人であり、成果の公開・普及状況は、ミッションを果たしていると評価される。また、これらのいくつかの優れた成果は、1年にそれぞれ約2件ずつ、各グループから国際会議等で、招待講演等として発表されているとともに、特許として公開されている。さ

らに、特に優れた研究開発成果：多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析法と組み合わせた高性能元素分析法、2波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法、ナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光電子顕微鏡、アクチノイドの分離・回収・抽出剤（TODGA）等の開発成果は、特に原子力以外の他分野に、大きな波及効果をもたらすと期待される。

本研究評価の対象期間中に得られた研究開発成果に立脚し、次期5カ年の研究開発計画が策定された。その計画策定では、今期の成果に対する自己評価に基づき、4つの主要課題領域は、それぞれ設定された2～3の主要課題（中期目標）をグループ横断的に編成された中規模のチームで遂行する方策を打ち出している。また、物質科学研究部は、原研における物質科学研究の基礎的部分を受け持つことを明確にし、より工学的な研究には、推進する所内他部署との柔軟な連携で協力する体制としている。さらにキャッチアップ的なものよりもフロンティアランナーとして国際的競争力のある研究に、人員、資金の集中を図るとしている。これらの研究開発計画は、平成14年度の事前課題評価でも高い評価を受け、優れた研究開発成果の達成が期待されている。

1. 専門部会の目的

「日本原子力研究所における研究開発評価の基本指針」及び「研究所評価委員会及び研究評価委員会規程」に基づき、研究評価委員会の下に物質科学研究専門部会を設置し、東海研究所の物質科学研究部における平成10年度から平成14年度までの研究開発課題の実績について、事後評価を行う。

2. 評価の方法

2.1 専門部会の構成

部会長：森田 健治	名城大学 理工学部教授
評価委員：齋藤 鐵哉	物質・材料研究機構監事
専門委員：大塚 孝治 長我部信行	東京大学 大学院理学系研究科教授 株日立製作所 基礎研究所長
塚本 哲生	オリジン電気(株) 地球環境管理室長
三宅 潔	埼玉大学 大学院理工学研究科教授
森山 裕文	京都大学 大学院工学研究科教授
脇田 久伸	福岡大学 高機能物質研究所長・教授

2.2 事後評価対象課題

事後評価の対象となる課題は、物質科学研究部における平成10年度から平成14年度までの研究開発課題及び研究支援業務課題の実績全般である。なお、平成14年度における同部の研究開発課題及び研究支援業務課題は、以下の6研究テーマ及び1業務課題である。（*:研究支援業務課題）

放射線場物質科学（主要課題領域Ⅰ）

- 1) 核物理・核化学的手法による原子核科学の研究（原子核科学的研究グループ）
- 2) 反応のダイナミックス及び電子状態の研究（原子分子科学的研究グループ）

極限物性・新材料科学（主要課題領域Ⅱ）

- 3) 極限物性の解明と新素材開発の研究（極限物性研究グループ）
- 4) 原子力材料の照射効果の研究（材料照射解析研究グループ）

アクチノイド科学（主要課題領域Ⅲ）

- 5) アクチノイド凝縮系の物性研究（アクチノイド科学的研究グループ）
- 6) 重元素溶液系の抽出分離に関する開発研究（抽出分離化学研究グループ）

施設開発・運転管理（主要課題領域IV）

- 7) 加速器系の運転・管理*（加速器管理室）

2.3 評価のプロセス

今回の事後評価は、1次評価及び2次評価の2段階をとる。

1次評価においては、被評価部門から提出される評価用資料に基づき、下記の評価項目、評価の視点に沿った項目別の暫定的評価を行い、また必要に応じてその他の所見を示すとともに、被評価部門に対する質問事項があれば、これを示す。

2次評価においては、上記の評価用資料（追加の補足説明資料があれば、これを含む）及び専門部会における被評価部門からの説明に基づき、下記の評価項目、評価の視点、評価の基準に沿った項目別の最終的評価を行い、また必要に応じて、その他の所見を示し、これらを踏まえて総合所見を取りまとめる。

第2次評価における専門部会会合開催の概況は、次のとおりである。

1. 日時：平成15年11月14日（金）13:30～17:00

2. 場所：東京国際フォーラム G410会議室

3. 議事次第

- (1) 専門部会審議の開始に当たって
 - 1) 部会長挨拶、新任委員紹介
 - 2) 関係者紹介、資料確認（事務局）
 - 3) 第2次評価の作業手順について（事務局）
- (2) 物質科学研究部の研究開発実績について
 - 1) 説明：吉田 善行 物質科学研究部長
 - 2) 質疑応答
- (3) 総括討議
 - 1) 評価に関する討議
 - 2) 評価結果の取りまとめについて（事務局）

2.4 評価項目及び評価基準

2.4.1 項目別評価

(1) 研究開発課題

1) 評価項目及び評価の視点(「」は評価の視点)

(a) 研究開発課題の目的達成度

「当初の目標に対する達成度」

(b) 研究開発実施経過の妥当性

「研究開発の展開の妥当性。研究資源（予算、人員、施設・装置等）の活用の妥当性。原研内外との協力・連携の実施の妥当性。研究開発の成功・不成功の要因の把握・分析の妥当性」

(c) 人材育成

「人材育成の実績の妥当性」

(d) 研究開発の成果の普及・波及効果

「成果の公開・発表状況。成果の波及効果の把握・普及。他の科学技術分野への貢献・波及効果の有無」

(e) 将来への研究開発の展開

「次期5ヵ年研究開発計画の立案への効果、一般科学技術的な意義・効果等」

2) 評価の基準

上記の項目別評価に対して、5段階評価（5：優れている、4：やや優れている、3：普通、2：やや劣っている、1：劣っている）を行う。

(2) 研究支援業務課題

1) 評価項目及び評価の視点(「」は評価の視点)

(a) 研究支援業務の実績・成果

「当初の目標に対する達成度。トラブルがあった場合の対応、付加的な寄与や創意工夫等の成果を考慮」

(b) 研究支援業務の進め方の妥当性

「業務計画の妥当性。資源（予算、人員等）の配分・活用の妥当性。原研内外との協力・連携の実施の妥当性。目標とした結果が得られなかった原因・理由等の把握・分析の妥当性」

(c) 人材育成及び士気確保の措置

「人材育成の実績の妥当性。士気確保の措置の実績の妥当性」

(d) 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果

「成果の波及効果の把握・普及。他の科学技術分野への貢献・波及効果の有無。今後の業務計画等への反映」

2) 評価の基準

上記の項目別評価に対して、5段階評価（5：優れている、4：やや優れている、3：普通、2：やや劣っている、1：劣っている）を行う。

2.4.2 その他の所見

上記の項目別評価の視点以外の特記すべき所感、問題点、提言等を示す。

3. 物質科学研究部における研究開発実績の概要

物質科学研究部が示した平成 14 年度までの 5 カ年間の研究開発実績の概要は以下のとおりである。

3.1 全体概要

3.1.1 原研における物質科学研究

(1) 物質科学研究の意義と目標

物質科学の研究は、原子力研究開発の基礎・基盤の主要部分を占める。そして、原子力における物質科学は、原子力分野に特有な物質と研究内容を対象とする、独特な科学技術体系を形成している。本来、“物質”とは、物質の根源である原子、その構成要素である核子の集合体としての原子核、原子の集合体である分子、原子・分子の集合体としての固体、液体などの凝縮系など、われわれを取り巻く全ての“実在”を指すが、原子力分野では、原子核からマクロスケールの材料に至るまでの極めて広範で多種多様な物質を取り扱う。原子力における物質科学研究のこのような広範性、多様性は他の分野に比類をみないが、それはそもそも原子力が原子核反応でエネルギーを生産する技術であり、また原子力特有の課題の多くが物質と放射線との相互作用に関するものであり、さらに原子力ではアクチノイドのような特殊な物質を取り扱うという特殊性に起因するものである。以上の背景の下に、物質科学研究部をはじめとする原研内の広範な部門において、物質科学の研究と開発が進められている。

極めて広範な物質を対象とする原子力における物質科学研究のうち、原研の物質科学研究部では、重点的に進める課題として次の 2 つを取り上げている。

(i) 原子力技術の革新に繋がる政策的ニーズに沿った目標を掲げた体系的、総合的研究を進める。これには、核変換技術や新型炉のための原子核データの整備、核融合炉候補材料や軽水炉材料の照射効果・健全性の評価、核燃料サイクル高度化のためのアクチノイドの研究、などがある。

(ii) 原子力の特長を活かしてこれまでに蓄積した成果を、原子力以外の分野の科学技術の発展に活かすための基礎研究を進める。それには同位体制御材料の創製、放射線照射による材料の改質に関する研究や、加速器、放射光施設、研究炉などを利用する物質科学研究などがある。

物質科学研究部で進める研究の4つの主要課題領域とそれらの目標は、次のとおりである。

- ①放射線場物質科学（主要課題領域Ⅰ）；高エネルギー照射場における物質の挙動を総合的に捉え、原子核科学と物性研究の境界領域の解明を通して原子力用新材料開発の途を拓く。電磁波と原子分子との相互作用、反応のダイナミックスや電子状態を究明し、新物質の創製を図る。
- ②極限物性・新材料科学（主要課題領域Ⅱ）；原子炉環境で材料が置かれる極限的条件下での材料の物性を研究し、新しい原子力システムの開発やシステムの長期安定運転を可能とする新素材・材料の開発を進める。
- ③アクチノイド科学（主要課題領域Ⅲ）；アクチノイド化合物の種々の環境における構造、相状態、熱力学的性質及び電子状態等を解明するとともに、溶液中でのアクチノイドと有機配位子との反応機構を解明し、新しいアクチノイド分離法を創造する。
- ④施設開発・運転管理（主要課題領域Ⅳ）；物質科学研究を支える高エネルギーイオン源としてのタンデム加速器の効率的運転と性能改善を進める。

（2）国内及び国際的研究開発の中での位置付け

物質科学研究それ自体は極めて広範な“物質”を対象とするものであり、原子力分野に限らずほとんど全ての分野でそれが研究対象になる。そのため他機関の研究と重複することなく、独創的な成果を効果的に達成するには、国内、国際的視野に立った的確な研究課題の設定が必要である。物質科学研究部では、原子核科学、同位体科学、照射場材料科学、アクチノイド科学などの分野において、独自の研究を通して国内、国外的にみても十分に質の高い成果を生み出しており、先導的役割を果たしてきている。原研における物質科学研究が高い水準にあることは、原子力研究開発を担う総合的研究機関としての原研にとって、極めて意義深い。このような成果が得られる背景の一つに、同分野の研究を実施するためのタンデム加速器、原子炉などの大型施設や、アクチノイド取扱施設などの特殊施設を原研が保有しているという特殊環境があげられる。今後とも、これらの大型施設、特殊機能を活用する物質科学の研究を積極的に進め、また、同様な施設を保有しない大学、研究機関や企業等と連携して研究を促進していくことが、原研における物質科学研究を発展させるための一つの方向性である。

国際的な位置付けについては、特に研究の独創性を確保することが重要である。そこではより純粋に、学術的、技術的優位性が要求されるからである。欧米諸国と比較したとき、わが国の原子力基礎研究に対する人的、経済的資

源は多くはない。このような状況を考慮しても、効率よく成果が得られるような課題の重点化が必要である。前述の物質科学部における研究開発項目もこのようにして重点化されている。

3.1.2 主要な研究開発の主な成果と成果の活用

① 放射線場物質科学の研究の成果とその活用

代表的成果は、重イオン照射によって励起された高スピン状態の原子核の構造、性質を実験・理論両面から究明した成果である。これらは将来、核構造の統一的理解にも繋がる可能性を秘めており、学術的価値が高い。同研究をさらに発展させて、平成14～18年度には²⁴¹Am、²⁴⁴Cmなどの核データ取得のための文科省公募型研究を進める。

当初の予想以上の大きな成果として、多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析法と組み合わせた高性能元素分析法の開発がある。同法は、それを利用する多くの分野に波及効果を及ぼすと期待されており、すでに隕石分析による宇宙物理研究、地質試料分析による大量種絶滅の原因解明研究などの境界領域での応用が進んでおり、また、平成15年度から協力研究で、食品、文化財、放射性廃棄物中の微量元素、核種の分析への同法の適用を試みるなど、今後、産業利用も含めた広範な応用が期待できる。

もう一つの顕著な成果は、2波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法の開発である。これにより従来法と比較して10倍高効率の²⁸Siの濃縮を可能とした。²⁸Si濃縮シリコンが高い熱伝導率を有することを利用する高熱伝導性半導体基板や、核スピンを持つ²⁹Siを取り除きPをドープする、あるいは²⁸Si中に²⁹Siを周期的に配置する量子コンピュータなど、濃縮シリコンの利用は将来の半導体分野での注目株であり、開発した²⁸Si大量濃縮法は将来実用化の期待もある。

② 極限物性・新材料科学の研究の成果とその活用

3次元ナノ構造制御法とそれによる新素材、材料の開発研究で顕著な成果を得た。すなわち、シリコン基板の水素終端処理法を考案し、それによってシリコン上にSrOの結晶成長を実現した。また、イオン照射法でシリコン表面を最適に前処理することによって、その表面に高品位な β -FeSi₂薄膜を作製することに成功し、環境半導体の利用に向けてその物性研究を加速させる成果として今後の進展が期待できる。さらに、世界に先駆けてナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光顕微鏡を完成させ、作製したナノ構造制御材料などの原子分解能での広角度暗視野像の観測に成功した。同開発によ

って、電子顕微鏡の分析能力の画期的向上がもたらされる可能性がある。これらの成果は、わが国の科学技術推進策の一つであるナノテクノロジー研究の進展に大きく寄与すると期待される。

高エネルギー重イオン照射による酸化物や金属中の高密度電子励起の初期過程が、クーロン爆発であることを実験的に解明した成果を発展させ、軽水炉圧力容器鋼モデル合金の脆弱性促進現象に電子励起が寄与することを解明した。さらには同機構に基づけば軽水炉燃料の劣化機構を解明できる可能性も示唆しており、今後の展開が期待できる。

核融合炉構造材候補の低放射化フェライト鋼が良好な特性を有すること、及び照射による破壊靱性の低下が課題であることを明らかにした成果を基に、核融合会議で「候補材料として低放射化フェライト鋼、先進材料としてSiC/SiC複合材料を重点化する」材料開発中期計画が策定された。核融合増殖材料である Li_2TiO_3 の構造や組織に及ぼす水素、ヘリウム原子の影響を評価した成果は、核融合プラント系の設計に大きく貢献する。

③アクチノイド科学の研究の成果とその活用

Pu-Zr-O 酸化物の酸素ポテンシャルの測定、U、Np、Pu 含有酸化物の相状態、熱膨張率、比熱容量、電気伝導率の測定、さらにはメスバウア分光法、放射光 X 線吸収微細構造 (EXAFS) 測定法による Np 化合物の構造・物性の解明などの一連の成果は、アクチノイド科学を進展させるとともに、革新的燃料や廃棄物処分技術の開発に資する。さらに、 AmN 、 $(\text{Cm}, \text{Pu})\text{N}$ 、 $(\text{Am}, \text{Y})\text{N}$ 、 $(\text{Am}, \text{Zr})\text{N}$ を酸化物から炭素熱還元法によって合成し、それらの相互固溶挙動や化学的安定性を調べた結果は、核変換用窒化物燃料、及び核変換ターゲットの基盤として貴重である。さらに、このようにして蓄積したアクチノイド化合物の物性データは、燃料の高燃焼度化、プルサーマル、分離変換、乾式再処理等の新しい原子力システムの開発に資する。

アクチノイド等の分離に有効な新規な抽出剤の開発を試み、TODGA などの抽出剤の開発に成功した成果に引き続き、それらを抽出剤とする新しい概念の使用済み核燃料再処理プロセス (ARTIST プロセス) を構築し、将来の革新的原子力エネルギーシステムの開発にとって有益な概念を提供した。高レベル放射性廃棄物の分離変換技術の開発を進め、国のオメガ計画に貢献した。また、量子化学計算、分子動力学シミュレーション等による計算化学研究によって得られた成果が発展すれば、アクチノイドのみならず他の元素の多様な化学的挙動の理論的描写や新物質の創製にも道を切り拓く。

④タンデム加速器の運転管理業務の成果とその活用

ほぼスケジュールどおりの年間約 200 日(約 4,600 時間)の運転を実施し、重イオン照射による原子核科学、物質科学の研究を支援した。老朽化電源への対策として、磁場値制御のスイッチング電源を開発し高性能化と省電力化を達成した。世界で初めてタンデム加速器で希ガスイオンを加速するため、ガス流量制御と希ガス処理用真空系を改良して高性能なイオン源を整備した。

3.1.3 研究開発の今後の展開

3.1.1(1)に記載した意義を有する原研における物質科学研究をさらに推進するために、物質科学研究部での次期 5 カ年間（平成 15～19 年度）の開発計画を策定し、平成 14 年度に事前評価を受けた。策定に当たっては、4 つの主要課題領域を設定し、各領域は明確な達成目標を有する 2～3 の主要課題（中期目標）で構成し、グループ横断的な中規模のチームでこれを遂行することとした。4 主要研究課題領域と各領域での主要課題は以下のとおりである。

(1) 主要課題領域 I : 原子核科学の研究

放射線利用による原子核の構造の研究と基礎原子核データの取得、放射線計測技術の開発を行う。

主要課題 I-1 ; ガンマ線・レーザー核分光による核構造の研究

主要課題 I-2 ; 核物理手法による新分析法の開発

(2) 主要課題領域 II : 材料創製・固体物性の研究

放射線を用いる反応の制御による同位体材料創製研究、新素材・新微細加工技術を用いる新物質創製とその機能解明研究、高エネルギービームと物質との相互作用の解明とそれを用いる材料改質研究を行う。

主要課題 II-1 ; 同位体分離と同位体制御による物質創製研究

主要課題 II-2 ; 3 次元ナノ構造制御による新物質創製及び物性発現機構の解明

主要課題 II-3 ; 高エネルギー照射場物質科学研究

(3) 主要課題領域 III : アクチノイド・重元素科学の研究

重元素基礎科学、分離化学研究及びアクチノイド固体、溶融塩科学的研究を進める。

主要課題 III-1 ; f 元素・重元素化学系の構造・反応制御研究

主要課題 III-2 ; アクチノイド凝縮系の物性研究

(4) 主要課題領域 IV : 加速器の運転・管理及び RNB 加速器系の開発

タンデム加速器の運転・管理を行うとともに、RNB (放射性核種ビーム)

加速器系の開発研究を推進する。

主要課題IV-1；タンデム加速器系の運転・管理及びRNB 加速器系の開発

これらの課題を進めるに当たって、上述した主な研究成果を次のようなやり方で発展させていく。

①放射線場物質科学の展開

高スピニ状態の原子核の構造、性質の研究については、核構造の統一的理解を目指し、さらには原子力ミッションに対応して、核変換用の超ウラン核種の核データを取得する。多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析法、さらには即発ガンマ線分析法と組み合わせ、更なる高感度化、高性能化を図り、産業利用を加速する。2波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法による大量生産法の開発などを通して、シリコン同位体制御材料の半導体材料等としての実用化を促進するための研究を進める。あわせてシリコン以外の元素の同位体濃縮法を開発し、同位体制御材料の利用分野を開拓する。

②極限物性・新材料科学の展開

高品位 β -FeSi₂薄膜の利用を促進するための研究を進めるとともに、ナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光顕微鏡のナノテクノロジー分野での活用を促進する。また、高密度電子励起反応を利用する材料の改質法を探索する。核融合炉構造材候補材料の照射効果研究で蓄積した技術的、学術的知見を、軽水炉や低減速炉などの新型炉、あるいは大強度陽子加速器ターゲットの材料の照射効果解析に適用し、多様な材料の照射損傷挙動を解明する。

③アクチノイド科学の展開

超ウラン元素化合物の固体系、溶融塩系での物性研究を発展させ、核変換や乾式再処理の開発に必要なデータを取得する。アクチノイドの溶液化学的特性の精緻な解明を進める。ARTISTプロセスの概念の完成とプロセスの経済性、導入効果等を総合的に評価する。

④タンデム加速器の運転管理業務の展開

タンデム加速器の円滑な運転管理を達成する。短寿命核種を加速する機能を整備し、新規なイオンビームと反応系を可能にして原子核科学や物質科学の飛躍的進歩に資する。

3.2 研究開発実績

3.2.1 主要課題領域の構成、研究開発目標及び得られた成果

主要課題 (担当グループ)	研究目標	研究成果の内容、達成度 【業績、技術開発等】
(1) 放射線場物質科学 (主要課題領域 I)		
核物理・核化学的手法による原子核科学の研究 (原子核科学研究グループ)	<ul style="list-style-type: none"> ・超変形状態、高スピン状態原子核の構造、反応、性質の解明 ・多重ガンマ線分析法等による物質の特性及び動的挙動研究のための新手法の開発 <p>[副次・発展的成果]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・クーロン励起完全核分光手法を開発し、Zn、Ge、Se、Kr、Mo 等の電磁気モーメントの決定。モンテカルロ殻模型により不安定領域での殻構造と核変形の記述に成功。 ・多重ガンマ線検出法を用いて、²⁴¹Am 及び²⁴³Am の中性子捕獲断面積、Np、Am、Cm 核種の陽子誘起核分裂収率、La の崩壊エネルギーなどの精度の良い核データを取得。 ・高分子中での陽電子消滅過程で捕捉電子が関与する新機構を発見。 <ul style="list-style-type: none"> ・多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析に適用し、pptまでの高感度、%オーダーの高精度、迅速、49種の多元素同時定量新分析法の開発に成功 (特許 5 件、プレス発表 2 件)。
反応のダイナミクス及び電子状態の研究 (原子分子科学研究グループ)	<ul style="list-style-type: none"> ・電磁波、イオンと原子分子の相互作用、反応ダイナミクス、電子状態の解明と反応経路制御法の開発 ・レーザーを利用する原子分子、クラスターの反応制御法開発 <p>[副次・発展的成果]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・部分重水素化アンモニア (NH_2D 及び NHD_2) の振動励起分子の紫外光分解において、N-D 伸縮振動を励起することによって N-D 結合切断を、N-H 伸縮振動を励起することによって N-H 結合切断を優先的に起こすことに成功。 ・最も簡単な超原子価分子 Li_2F の存在を初めて実験的に確認。多くのアルカリ金属化合物、クラスターの構造と電子状態を解明。 ・原子衝突研究に不可欠な高効率で安定性の良い原子ビーム発生法を考案。重金属原子の電荷移行過程や励起移動が原子構造に強く依存することが判明。 ・Si_2F_6 の 2 波長赤外光同時照射による同位体分離法を考案し、従来の方法より 10 倍効率的に分離が可能であることを実証 (特許 2 件、プレス発表 1 件)。

主要課題 (担当グループ)	研究目標	研究成果の内容、達成度 【業績、技術開発等】
(2) 極限物性・新材料科学 (主要課題領域 II)		
極限物性の解明 と新素材開発の 研究 (極限物性研究 グループ)	<ul style="list-style-type: none"> ・照射下極限環境における物性変化と回復現象の解明 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化物超伝導体、セラミックス、金属の電子励起効果の初期過程がクーロン爆発であることを実験的に証明。軽水炉圧力容器鋼モデル合金の脆弱性促進現象に電子励起が寄与することを証明。電子励起されたイオンの内殻励起準位を決定。
	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力環境に適合する新素材、新材料の設計、開発 <p>[副次・発展的成果]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・電子励起効果を利用する鉄系インバー合金の磁性改質に成功。 ・照射により Li_2TiO_3 表面に生成する TiO_2 が材料からのトリチウム離脱を遅延する事が判明。 ・Li_2TiO_3 の構造が、照射により生成する水素等の量に依存することを初めて解明。増殖材料の寿命評価、改良指針を提供。 ・酸化物超伝導体中に照射によって形成される円柱状欠陥の構造、磁性状態の解明。金属系超伝導体 MgB_2 の磁束ピン留め特性の解明。(マルチコアプロジェクト) ・3次元ナノ構造制御装置を開発し、水素終端処理したシリコン基板上に SrO の結晶作製に成功。 ・イオン照射による基板処理法を開発し、高品位のシリコン基板鉄シリサイド半導体薄膜の作製に成功。 ・ナノチップ電子銃を搭載した走査型電子透過エネルギー分光顕微鏡の製作。これを用いて GaAs 単結晶の広角度視野像の観測に成功。
原子力材料の照 射効果の研究 (材料照射解析 研究グループ)	<ul style="list-style-type: none"> ・耐放射線性低放射化材料、及び高温強度に優れた低放射化セラミックス系原子力材料の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・低放射化フェライト鋼の最適組成、熱処理条件の評価を寿命の 20%まで達成。破壊靱性、引張特性、高温水中割れ感受性、微細組織安定性を評価。破壊靱性低下への核変換生成ヘリウムの影響を解析。破壊靱性低下の抑制法として熱処理条件を最適化。IEA 国際協力等を通じて低放射化フェライト鋼の利用の可能性を提示。 ・SiC/SiC 複合材料の強制 CVI (FCVI) 法による高性能、高効率製造法の開発。低放射化、高強度、高熱伝導性の材料の作製に成功。日米照射実験の標準試料として供給。

主要課題 (担当グループ)	研究目標	研究成果の内容、達成度 【業績、技術開発等】
	<ul style="list-style-type: none"> IASCC 等の機構の解明、及び原子力環境用金属系材料の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 応力対歪みの相関を表す構成方程式への照射効果の解析を達成、及び IASCC の機構、構造設計での照射効果の課題解決に適用。微小試験片技術の一つとして、ホット試料用のイオンビームによる電子顕微鏡観察用薄膜作製システムを開発。
(3) アクチノイド科学 (主要課題領域III)		
アクチノイド凝縮系の物性研究 (アクチノイド科学研究グループ)	<ul style="list-style-type: none"> アクチノイド酸化物の相状態、化学ポテンシャル、不定比性等の熱力学的性質の解明 アクチノイド窒化物の相状態、熱力学的性質の解明 溶融塩系媒体の構造、熱物性、熱力学的性質等の測定、評価 <p>[副次・発展的成果]</p>	<ul style="list-style-type: none"> Pu 系酸化物の酸素ポテンシャル測定技術を開発、データ取得。U、Np、Pu 酸化物の相状態、熱物性等を解明。Np 化合物のメスバウア分光、EXAFS 測定により、構造・物性を解明。 アクチノイド窒化物を合成し、その相互溶解性、Am 系窒化物の化学的安定性を解明。 溶融塩化物の EXAFS 測定と分子動力学計算による局所構造解析と、物性予測。溶融塩の密度測定法を開発しデータ取得。希土類元素の溶融塩への溶解、陰極析出挙動等を解明。 Am、Cm の窒化物を酸化物から炭素熱還元法により合成できることを世界で初めて実証。
重元素溶液系の抽出分離に関する開発研究 (抽出分離化学研究グループ)	<ul style="list-style-type: none"> 再処理における抽出分離の高度化技術の開発、及びアクチノイド抽出剤の創製と抽出分離技術の開発 実高レベル放射性廃棄物のホット 	<ul style="list-style-type: none"> 放射光実験等により抽出剤や反応場の分子設計に必要な構造データを取得し、これらを検討することによって、有用な新規抽出剤を開発。 量子化学計算や分子動力学 (MD) シミュレーション等により、溶液系における重元素の化学特性の理論的描写に成功。 世界最高効率でアクチノイドを分離・回収できる抽出剤、TODGA の開発に成功 (特許 4 件、プレス発表 1 件)。 TODGA の抽出特性及び耐放射線性を解明。TODGA+モノアミド混合溶媒を用いて、TODGA の耐放射線性、抽出容量が向上することを発見。 逆ミセル系反応場を用いる微量金属の高選択性的分離・濃縮法の開発。 4 群分離のホット試験の結果、DIDPA 抽出工程で Am 及び Cm を、脱硝沈殿工程で Tc-白

主要課題 (担当グループ)	研究目標	研究成果の内容、達成度 【業績、技術開発等】
	試験による 4 群分離プロセスの改良、総合評価 [副次・発展的効果]	金族元素沈殿を、また、無機イオン交換体吸着工程で Sr+Cs を、目標の収率で回収できることを確認。4 群分離法採用による廃棄物体積、中間貯蔵期間、貯蔵量の低減効果を定量的に評価。 ・ TODGA、モノアミドを抽出剤とする、廃棄物発生量低減化・核拡散抵抗性に優れた新規再処理プロセス (ARTIST プロセス) 概念を構築。
(4) 施設開発・運転管理 (主要課題領域IV)		
加速器系の運転・管理 (加速器管理室)	・タンデム加速器系の運転保守 ・加速器系の省力運転、高性能化のための技術開発	・年間平均 200 日、約 4,600 時間の運転により重イオンを利用する各種研究を支援。 ・安定かつ高度な加速器制御を目指し、プログラム改良とともに連動制御を行えるよう電磁石電源を開発。老朽化制御計算機を更新して制御プログラムの整備を容易化。 ・高電圧端子に設置するイオン源であり高電圧、高圧縮ガス下での動作を可能にする機器を開発し、多価イオンを発生し高エネルギー化を実現。ターボポンプ真空系を改良。 ・加速器性能を左右する加速管や超伝導加速空洞の表面清浄について、高圧、超純水ミスト洗浄法で効果的洗浄と高性能化を達成。

3.2.2 主要課題の成果の発表状況

論文	プロシーディングス	原研レポート (公開)	口頭発表* 国内+国際会議	特許**
放射線場物質科学 (主要課題領域 I)				
150	25	140	138(1)+58(7)	9/0
極限物性・新材料科学 (主要課題領域 II)				
216	34	37	102(5)+32(7)	6/2
アクチノイド科学 (主要課題領域 III)				
155	59	27	148(11)+112(7)	9/1
施設開発・運転管理 (主要課題領域 IV)				
3	36	28	31+10	0/0
合計				
524	154	232	419(17)+212(21)	24/3

* : () 内は招待講演数で内数、**特許：出願／取得

3.2.3 研究協力

(1) 国内協力

原研は、研究炉、加速器、放射光施設、あるいは核燃料、放射性物質取扱施設などの特殊施設、設備を有するわが国随一の研究機関である。原研がこれらの施設、設備を利用して研究を効果的に促進するため、あるいは大学、国公立機関、企業等が原研の施設、設備を活用して研究成果を達成するためには、両者の連携が欠かせない。原研はこのような背景のもとで、外部機関と積極的な研究協力を進めている。

研究協力の進め方にはいくつかの異なった方式があるが、当部は主に、所管する東海研タンデム加速器を中心施設として、これを利用する国内の大学などと研究協力を進めた。また原研-大学プロジェクト共同研究「核燃料サイクルにおけるバックエンド化学」および「放射線高度利用研究」に参画するとともに、大学、企業等との協力・共同研究を進め、また連携大学院制度に基づく大学との協力を進めた。

研究協力の概略は以下のとおりである。

(i) タンデム協力、共同研究

外部機関からの応募課題について、タンデム加速器専門部会の課題審査会（大学、原研等の専門家で構成）で専門的価値を審査し、採択された課題について協力、共同研究を実施した。平成 10～14 年度の実施課題数、利用日数等は以下の通りである。

項目 年度	協力/共同研究 実施課題数	協力研究 利用日数	共同研究 利用日数	総運転日数に 占める割合(%)
10 年度	16	98	8	66.3
11 年度	23	152	4	66.1
12 年度	23	136	9	65.0
13 年度	25	145	13	76.0
14 年度	29	188	4	88.5

これらの共同、協力研究によって得られた主な成果は以下のとおりである。核物理・核化学分野では、クーロン障壁近傍での変形核と重イオンとの融合反応機構を解明した。クーロン励起による完全核分光法を完成し、Zn、Ge、Se、Kr、Mo のアイソトープの核変形と変形共存を明らかにした。さらに、

104(Rf), 105(Db)番元素を合成しそれらのイオン交換挙動を明らかにした。

固体物理・材料照射分野では、固体中の高速イオンの挙動を解明した。短寿命核を用いた秒単位の高速拡散研究手法を確立した。酸化物、金属中の強い電子励起効果を見出し、この成果は材料改質研究等に発展した。このような、高エネルギー重イオンが物質中に作り出す電子励起効果の研究では、原研が中心となり、多数の相手大学等と協力研究を実施した。

タンデム協力・共同研究の研究会を2年に1回開催し(平成11、13年度)、成果、将来計画等の発表、討論を行い、共同、協力研究の促進を図った。同研究会の結果を JAERI Conf. (99-013, 01-014)にまとめた。

(ii) 大学-原研プロジェクト共同研究 (第3期; 平成10年度まで、第4期; 平成11~13年度)

「バックエンド化学プロジェクト共同研究」では、Pu、Np含有の酸化物の相状態、熱物性などの系統的な測定、Np化合物のメスバウア分光法による構造解析、アクチノイド用新抽出剤の開発、などを実施し、革新的燃料や廃棄物処分技術のための基礎データを取得するなどの成果を得た。

「放射線高度利用プロジェクト共同研究」では、TIARAを用いる核融合炉材料照射損傷への核変換生成物の影響評価等について新知見を得た。

(iii) 協力・共同研究

- ・共同研究；超伝導体のイオン照射による特性及び微細構造変化に関する研究 ((財)ファインセラミックスセンター／極限物性)、磁束粒子とコラムナ一欠陥との動的相互作用の観察 (日立製作所㈱／極限物性)、材料の照射効果に関する研究((財)電力中央研究所等／材料照射解析)を実施した。また超ウラン元素の高温化学的挙動に関する共同研究を実施した (日本原子力発電㈱／アクチノイド科学)。
- ・協力研究；金属ナノ結晶材料の照射特性に関する研究 (茨城大)、高エネルギー重イオンによる高密度電子励起を利用した磁性体改質の研究 (岡山大、筑波大)、低放射化核融合炉材料の重照射効果の評価 (北大、京大)、照射黒鉛の放射性核種の存在状態及び分布に関する研究 (名大) を実施した (材料照射解析)。高純度アクチノイド金属の新調製法の研究 (東北大)、アクチノイド複合酸化物の構造と磁気的性質の研究 (北大)などを実施した (アクチノイド科学)。

(iv) 連携大学院制度による大学との協力

連携大学院制度のもと、筑波大学、東北大学、及び茨城大学に客員教授、

助教授として職員を派遣し、また当部には学生研究員を受け入れた。

(2) 国際協力

先導的な物質科学研究を効果的に促進するために、国際協力を推進した。

混合スペクトル核分裂炉による第一壁及びブランケット構造材料の日米協力試験(DOEとの核融合研究開発に関する実施取り決め附属書I)で、HFIR(ORNL)を用いた共同照射実験を実施し、低放射化フェライト鋼、オーステナイトステンレス鋼の中性子照射挙動の評価、強度、破壊靭性への照射効果データを取得した。

IEAの核融合炉材料開発に関する国際協力で、低放射化フェライト鋼、SiC/SiC複合材料及び増殖材料等の製造方法や照射効果に関する共同試験、情報の交換、ワークショップ開催、材料照射用加速器型中性子源の共同開発を進めた。

米国の国立研究所 ORNL、LBNL、LANL 等と日米核物理研究協力協定に基づく協力を進めた。また、ORNLとAm-Cd合金、Am窒化物等についての基礎物性データの取得のための協力研究、オランダ原子力研究コンサルタントグループ(NRG)と塩化物の熱力学データ測定及びデータベースの整備のための協力、さらにフランス原子力庁(CEA)と核種群分離法、核変換用燃料及び乾式再処理法の開発に関する情報交換協力を実施した。

3.2.4 研究資源の実績（平成10年度～14年度）

予算（百万円）						人員	
認可予算			外部資金			合計	職員 +その他* (人・年)
研究経費	運転維持費	研究設備費	特別会計	その他(受託・共研等)			
(1) 放射線場物質科学（主要課題領域I）							
171	96	—	67	1	336	67 + 10	
(2) 極限物性・新材料科学（主要課題領域II）							
1,535	—	—	—	—	1,535	86 + 24	
(3) アクチノイド科学（主要課題領域III）							
779	40	—	280	—	1,099	110 + 12	
(4) 施設開発・運転管理（主要課題領域IV）							
2,797	—	—	—	—	2,797	44 + 0	
(物質科学研究部)							
2,485	2,933	—	347	1	5,767		

(人員欄*印は業務協力員、外来研究者、博士研究員等の常勤者。)

3.2.5 人材育成

基礎研究部門である物質科学研究部が果たすべき重要な役割のひとつに、次世代の原子力開発を担う専門家の育成があり、そのため種々の形態の人材育成策を実施した。

部内の若手研究・技術者には、質の高い専門知識、技能の習熟を求め、学位取得（当該期間中に学位取得した職員は10名）、海外留学・派遣、放射線取扱主任者などの資格取得などを推奨した。また博士研究員を多く採用し、将来原子力分野の中心的存在になるよう、専門的知識の習得に努めさせた。

大学生を積極的に受け入れ指導に当たった。大学院前期課程学生を夏季実習生として受け入れ、原子力基礎研究の現場を体験させた。それを契機に原子力界に進路を決めた学生も多い。大学院学生を対象とする特別研究生制度のもとで、多数の学生を受け入れた。アクチノイド科学分野では、大学-原研プロジェクト共同研究「バックエンド化学」の枠組みで共同研究を進めた特別研究生も多く、両機関の連携にとってパイプ役となった。また、茨城大学との連携大学院制度の下でほぼ定常に大学院生を特別研究生として受け入れた。なお、後期課程の学生についてはそのほとんどが、原研での研究成果を基に博士論文をまとめている。また、筑波大学等との連携大学院制度による学生実習生を積極的に受け入れた。

博士研究員等の受入数、大学非常勤講師派遣数
(平成10年度～14年度)

研究グループ	博士研究員	外来研究員	特別研究生	学生実習生	夏期実習生	学生研究生	講師派遣
原子核科学	4	0	7	0	0	2	12
原子分子科学	4	2	2	2	2	0	1
極限物性	9	1	10	3	3	1	14
材料照射解析	4	2	6	0	5	0	9
アクチノイド科学	0	1	14	2	4	0	3
抽出分離科学	4	2	11	2	7	1	14
加速器管理室	0	0	0	0	0	0	0
合計	25	8	50	9	21	4	53

3.2.6 国の研究開発計画／科学技術分野の学術的な進展への寄与

(1) 国の科学技術事業に大きな影響を及ぼした成果

原則的に、いずれの研究課題も国の原子力長期計画に則って計画、実施されたものであり、得られた成果は同計画の推進に資するものである。

「原子力材料の照射効果の研究」で実施した核融合炉材料の研究は、核融合会議での材料開発の方針に沿って進められ、得られた成果は直接、間接的に国の方策に貢献するものである。国の第三段階核融合研究開発基本計画のうち、核融合炉材料中期計画の策定に、基盤となる情報の照射データを提供し貢献した。

「極限物性の解明と新素材開発の研究」では、文科省が進める「超伝導材料研究マルチコアプロジェクト」のうち放射線照射・解析研究コアを分担し、多くの成果を得てプロジェクトの推進に貢献した。

「アクチノイド科学の研究」のもとで、高レベル放射性廃棄物の分離変換技術の開発を進め、国のオメガ計画の推進に貢献した。

平成14年度から導入された文科省公募型研究「革新的原子力システム技術開発公募技術開発テーマ」として、「高度放射線測定技術による革新炉用原子核データに関する研究開発」(原子核科学、連携)、「窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発」(アクチノイド科学、総括)、「全アクチノイド回収SF簡易処理法(ARTIST)に関する技術開発」(抽出分離化学、総括)を受託し、国の事業に貢献した。

(2) 科学技術分野の学術的進展への寄与

- ・高スピン状態の原子核の構造、反応、諸性質などに関する実験、理論両面からの基礎研究の成果は、将来、核構造の統一的理解にも繋がり学術的価値も高い。また、原子核科学の研究用に開発した高性能な多重ガンマ線検出法は、パルス中性子を利用する中性子捕獲断面積測定などにも有力である。

“振動励起+電子励起”法による部分重水素化アンモニウムの選択的同位体結合切断の成果は、レーザーによる化学反応経路制御の一般的実現及び化学反応論の発展に貢献する。また、 Li_2F 、 Li_3O 等の超原子価分子に関する成果は、構造化学の発展に貢献する。

- ・固体の電子励起による欠陥生成に関する成果は、固体の照射損傷機構に新しい概念を提供する。また、開発した極細電子ビーム用ナノチップ電子銃は、電子顕微鏡の分析能力の画期的向上をもたらす可能性がある。核融合炉、軽水炉等の構造材料の照射効果に関する新知見は、直接的には原子力に特有のものではあるが、一般的材料科学の見地からも価値を有している。

- ・アクチノイド化合物の相状態、熱力学的性質、高温物性等の基礎データ、新規抽出剤の合成研究を通して蓄積したアクチノイドの溶液化学、配位化学、分離化学等の基礎知見は、アクチノイド科学の進展にとって貴重である。

3.2.7 成果の他分野への波及効果とその事例

開発した多重ガンマ線検出高感度分析法は、それを利用する多くの分野に効果を及ぼす。協力研究において、隕石分析による宇宙物理研究、地質試料分析による大量種絶滅事件の原因解明研究、¹²⁹I 分析によるメタンハイドレート成因究明研究など、境界領域での研究を開始している。また、スクラップ鉄のリサイクル促進のための純度分析、高機能材料の純度分析、米中の汚染カドミウムの分析、土壤の汚染重金属分析などに本法を適用することによって、それぞれの分析的課題が解決できるので、大きな社会貢献が達成される。

同位体濃縮シリコンは、²⁸Si を高濃縮することによって熱伝導率が向上することを利用する高熱伝導性半導体基板としての利用が注目されている。また、核スピンを持つ²⁹Si を取り除き P をドープする、あるいは²⁸Si 中に²⁹Si を周期的に配置する量子コンピュータの提案がなされるなど、濃縮シリコンの利用は将来の半導体分野での注目株である。開発したシリコン同位体濃縮法を確立することによって、同分野の研究が加速される。

3 次元ナノ構造制御法による結晶成長技術を応用することによって、“環境半導体”として注目される β -FeSi₂ 半導体の実用化への途が拓ける。

高エネルギー粒子が物質中に電子励起過程で作り出すコラムナー欠陥を利用する局所的な磁性材料の改質法は、高密度メモリー素子などの先端的デバイスに繋がる。

原子力材料の照射効果の研究用に開発した微小試験片材料試験技術が、核破碎中性子源用のターゲット材料照射試験片の作製に適用された。また、核融合炉実験炉用のオーステナイトステンレス鋼の照射効果評価の結果が、核破碎中性子源用のターゲット材料の選択等の基本データとして利用された。

アクチノイド科学の研究で得られた研究成果は、直接原子力に貢献とともに、わが国のアクチノイドの基礎・基盤研究としてのみならず、固体科学、溶液化学、分析化学、分離科学、など多くの境界領域の分野の基礎研究を進展させている。また、量子化学計算、分子動力学シミュレーション等による計算化学研究によって得られた成果が発展すれば、アクチノイドのみならず他の元素の多様な化学的挙動の理論的描写や新物質の創製にも道を切り拓く。

4. 評価結果

4.1 放射線場物質科学（主要課題領域Ⅰ）

(a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 * 4.5）

(* 5点満点に対する各委員の評価点の平均。以下同じ。)

高エネルギー照射場における物質の挙動を総合的に捉え、原子核科学と物性研究の境界領域の解明を通して原子力用新材料開発の途を拓くことを全体目標として、原子核科学グループは、核物理・核化学的手法による原子核科学の研究を進め、また原子分子科学研究グループは、電磁波と分子との相互作用、反応のダイナミックスや電子状態の解析による新材料の創製を目指した。これらの研究は、それぞれその目的を高いレベルで達成していると評価される。

①原子核科学研究グループ：このグループの代表的な成果は、重イオン照射によって生成する高スピン状態の原子核の構造、性質を実験・理論両面から究明し、核反応や物質の照射効果など原子力にとって欠かせないこの分野の研究を進展させたことである。特に、クーロン励起完全核分光法を開発し、励起核の電磁気的性質や変形を明らかにし、その核構造を描写するモンテカルロ殻模型理論を構築した成果は、学術的に高く評価される。また、加速器駆動炉など新型炉の設計に必要な核データの整備もほぼ当初目標を達成している。核物理研究用に開発された多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析法と組み合わせた高性能元素分析法は岩石・地質試料中の Ir や環境試料中の ^{129}I の分析に適用され、その有効性が実証されて、極めて高い評価を受けている。また今後、産業利用をも含めた広範な分野への応用が期待できる。他方、当初目標に掲げた、核物理的手法による物質の動的挙動の研究は、 ^{133}Cs メスバウアプローブの開発、微小角散乱法による偏極 RI ビーム生成技術の開発などの成果を得たが、平成 12 年以降、主担当者の他部署への転出のため、終息している。

②原子分子科学研究グループ：このグループの最も顕著な研究成果は、2 波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法を開発し、シリコン-28 を従来法より 10 倍の高効率で濃縮できることを実証したことである。この成果は高性能半導体材料等の創製に繋がり、今後大きな波及が期待できる。また、レーザー照射による“振動励起 + 電子励起”法を用いて、部分重水素化アンモニア分子を選択的水素同位体結合切断し、その手法の有効性の一般性を実証している。さらに、レーザー・アブレーション法によ

り合成した超原子価分子 Li_2F 、 Li_3O および多種の化合物、クラスターの生成挙動と構造、電子状態を調べている。他方、ランタノイド化合物およびクラスターの生成、反応、構造の研究は今後の進展を期待する。

(b) 研究開発実施経過の妥当性 (評価点 4.0)

上述のように、研究開発課題の目的達成度が満足すべきレベルにあると評価されることから、研究開発実施経過は、限られた予算と人的資源や、与えられた条件下で、積極的な努力と創意工夫がなされて、特に問題がないと判断される。また、原研外部との協力研究、外部からの受託研究が積極的に実施されていることも評価される。

- ①原子核科学研究グループ：革新炉開発のために不可欠で、直接原子力の進展に資する、核構造と核反応の基礎データの取得が、初期目標として重点化され、後半に、核物理・核化学の先端的な多重ガンマ線検出法が分析化学的に高い有用性を示すとの予測をし、この方法の開発と各種試料への適用に資金と人員を集中されたことは高く評価される。
- ②原子分子科学研究グループ：“振動励起+電子励起”法による水素同位体結合切断が研究の当初目標に据えられ、博士研究員がこの研究に重点配分され、平成13年度からシリコン同位体の大量濃縮法の開発が重点化され、基礎研究とその成果の実用化研究がバランスよく進むように留意された点は有効であったと判断される。

(c) 人材育成 (評価点 3.5)

本主要課題領域では、博士研究員や、特研生の受入数は、全体として、それぞれ年平均2名程度あり、実習生や外来研究員の受け入れも実施されているが、他の主要課題領域に比べ少ない様に見受けられる。外部との人的交流を通しての人材育成に対して一層の努力が求められる。研究開発において、優れた成果を持続的に得るために、人的資源が不可欠であることを考えると、より積極的な人材の確保と育成が望まれる。

(d) 研究開発の成果の普及・波及効果 (評価点 4.4)

研究開発の成果は、その大半が学術論文として公表され、主要課題領域全体で平均すると、約2報/年・人であり、これと同等数が原研レポート(公開)に公表されおり、成果の公開・普及状況はミッションを果たしていると評価される。また、国際会議等で招待講演として発表され、あるいは特許としても公開されている件数が、それぞれ2件/年に及び、高く評価される。

本主要課題領域において、波及効果が特に大きいと予測される研究開発成

果は次の通りである。その一つは、高スピン状態の原子核の構造、性質の実験・理論両面からの研究成果であり、平成14~18年度、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm などの核データ取得のため、文科省公募型研究で進められる。次の一つは、多重ガンマ線検出法を中性子放射化分析法と組み合わせた高効率元素分析法の開発である。この分析法は、上述のように産業利用も含めた広範な応用が期待されるが、平成15年度から10以上の大学、研究機関、企業と連携して進める連携重点研究「多重ガンマ線検出と即発ガンマ線分析によるリアルタイム非破壊超微量元素分析法の開発と実試料への応用」において、食品、文化財、放射性廃棄物中の微量元素、核種の分析への応用が計画されており、基礎科学と社会を結びつけるものとして貴重である。

他の一つは、2波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法の開発である。この技術は、レーザーによる化学反応の制御における同位体シフトを利用したもので、他の元素の同位体濃縮に適用される可能性を有し、同位体科学の発展をもたらすと期待される。

(e) 将来への研究開発の展開 (評価点 4.0)

本研究評価の対象期間中に得られた研究開発成果に対する自己評価に基づき、平成15年度から始まった次期5カ年の研究開発計画が策定されている。この主要課題領域の原子核科学研究グループの進めてきた核物理・核化学的手法による原子核科学の研究が、主要課題領域Ⅰとして、次の様に2つの主要課題に区分して、それぞれの研究成果の活用により、新たに展開される。

主要課題領域Ⅰ：原子核科学の研究

放射線利用による原子核の構造の研究と基礎原子核データの取得、放射線計測技術開発を行う。

主要課題Ⅰ-1；ガンマ線・レーザー核分光による核構造の研究

主要課題Ⅰ-2；核物理手法による新分光法の開発

また、原子分子科学研究グループの進めてきた2波長赤外光照射法による高効率シリコン同位体濃縮法の開発研究は、主要課題領域Ⅱの主要課題の一つとして、シリコン同位体制御材料の半導体材料等としての実用化を促進するとともに、シリコン以外の元素の同位体濃縮法の開発を目指して、新たに展開される。これらの主要課題は、平成14年度に実施された事前課題評価において、高い評価を得ている。

4.2 極限物性・新材料科学（主要課題領域Ⅱ）

(a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 4.0）

原子炉環境で材料がおかれる極限的条件での材料物性変化の解析により、耐放射線性・低放射化に優れた材料の要件を明らかにし、新素材の創製、核融合炉材料の開発および原子炉材料の照射応力腐食割れ（IASCC）機構を解明するとともに、新しい原子力システムの研究開発やシステムの長期安全運転を可能にする新材料の開発を目的に、極限物性研究グループは、極限物性の解明と超伝導材料や環境半導体など新素材の開発の研究を進め、材料照射解析研究グループは、新規の材料研究を積極的に推進し、それぞれ当初の目的を達成していると評価される。

①極限物性研究グループ：このグループは、まず極限的条件の一つである高エネルギー粒子照射下における、酸化物超伝導体、セラミックス、金属の電子励起効果を解析し、その初期に生じる過程がクーロン爆発であることを実験的に示し、また、電子励起が軽水炉圧力容器鋼モデル合金の脆弱性の促進に寄与していることを示している。これらの結果の解析・予測から、鉄系インバー合金の磁気特性の電子励起効果を用いた改質に成功している。これらは、基礎研究としての学術的意義が高いと評価される。また、核融合増殖材料である Li_2TiO_3 の多重イオンビーム照射による構造や組織の変化を解析し、着実にデータの構築を実行している。さらに、シリコン基板表面の水素終端処理法の考案とそれによる SrO 結晶の積層の実現、イオン照射法を用いた高品位 $\beta\text{-FeSi}_2$ 結晶膜の積層の実現は、3次元ナノ構造制御法とそれによる新素材、材料の開発に貢献すると期待される。ナノチップ電子銃搭載走査透過エネルギー分光顕微鏡の完成は、このグループの顕著な成果の一つとして高く評価される。

②材料照射解析研究グループ：このグループは、低放射化フェライト鋼の照射効果の解析、すなわち、破壊靱性、引張特性、高温水中割れ感受性、微細組織安定性の照射による変化、および熱処理による強度向上の考案を着実に行い、また、先進材料としての SiC/SiC 複合材料の高性能、高効率製造法を開発し、低放射化、高強度、高熱伝導性の優れた材料の作製に成功し、同材料が日米-HFIR 共同照射実験の標準試料に選択されるなど、核融合炉材料の開発研究に大きく貢献している。また、微小試験片技術として、ホット試料用のイオンビームを用いた、電子顕微鏡観測用薄膜作製システムを、地道に開発している。

(b) 研究開発実施経過の妥当性 (評価点 3.9)

研究開発課題の目的達成度が当初設定のレベルにあると評価されることから、研究開発の実施経過は、核融合炉材料と核分裂炉材料の照射効果研究に共通して使用する種々の照射実験装置の共通化、共用化を図るなどの努力がなされていて、特に問題がないと判断される。また、原研外部との協力研究、共同研究、委託・受託研究が極めて多く実施されている点は高く評価される。

- ① 極限物性研究グループ：計画実施の初期に、基礎研究である、酸化物や金属の電子励起効果の解析に集中して取り組み、その後応用としての軽水炉圧力容器鋼の照射効果現象の機構解明や、物質改質法の開発に進むことを心掛けているが、これは極めて妥当であると評価される。他方、新材料の開発研究に繋がる、高品位の β -FeSi₂ 薄膜生成法の開発とナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光電子顕微鏡の完成に資金と人員を重点的に配分されたことは優れた視点であると評価される。
- ② 材料照射解析研究グループ：核融合炉用の低放射化フェライト鋼の照射特性評価、性能低下抑制法の開発などの研究の強化策は、時機を得たものと評価される。SiC/SiC 複合材料の製造法の開発に、日米協力による HFIR 共同照射実験の活用は、原研の国際協力に貢献していて、評価される。今後の核融合炉材料開発の成果の積極的な活用により軽水炉の IASCC の課題が解決されることを期待している。

(c) 人材育成 (評価点 3.8)

本主要課題領域では、博士研究員や特研生の受入数は、全体として、それぞれ年平均 3 名に達していて、且つリサーチフェローや外来研究員、学生実習生の受け入れもあり、原研の人材の確保と育成に貢献していると高く評価される。今後も持続的な人材の確保と育成に努力されることを期待している。

(d) 研究開発の成果の普及・波及効果 (評価点 3.9)

本主要課題領域における研究開発の成果は、そのほとんどが学術論文として公表され、全体で平均すると、約 2.5 報／年・人であり、成果の公開・普及状況はミッションを果たしていると評価される。また、国際会議等での招待講演としての発表や特許の公開もそれぞれ年平均 2 件弱あり、高いレベルのパフォーマンスを示している。

本主課題領域における、将来に波及すると期待される成果の一つは、ナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光電子顕微鏡の完成である。これを用いた材料評価は、当該分野に大きな波及効果をもたらすと期待される。

シリコン基板表面の水素終端処理法とその基板上への結晶膜の積層技術もまた新たな素材の開発に役立つと期待される。

(e) 将来への研究開発の展開 (評価点 3.8)

本研究評価の対象期間中に得られた研究開発成果に対する自己評価に基づき、平成 15 年度から始まった次期 5 カ年の研究開発計画が策定されている。この主要課題領域の極限物性研究グループの進めてきた新素材の開発研究は、主要課題領域 II の主要課題 II-2 として、高品位 β -FeSi₂ 薄膜の生成技術とナノチップ電子銃搭載走査型透過エネルギー分光電子顕微鏡による分析技術の活用により、新たに展開される。また材料照射解析研究グループが進めてきたシステムの長期安全運転を可能とする新素材、材料の研究開発は、主要課題 II-3 として、核融合炉構造候補材料の照射効果研究の技術的、学術的知見を、新型炉あるいは大強度陽子加速器ターゲットの材料照射解析に適用し、多様な材料照射損傷挙動の解明に繋げ、新展開される。その研究課題構成は、下記の通りである。

主要課題領域 II : 材料創製・固体物性の研究

放射線を用いる反応の制御による同位体材料創製研究、新素材・新微細加工技術を用いる新物質創製とその機能解明研究、高エネルギービームと物質との相互作用の解明とそれを用いた材料改質研究を行う。

主要課題 II-1 ; 同位体分離と同位体制御による物質創製研究

主要課題 II-2 ; 3 次元ナノ構造制御による新物質創製および物性発現機構の解明

主要課題 II-3 ; 高エネルギー照射場物質科学研究

これらの主要研究課題は、平成 14 年度に実施された事前課題評価で高い評価を得ている。

4.3 アクチノイド科学 (主要課題領域 III)

(a) 研究開発課題の目的達成度 (評価点 4.6)

アクチノイド化合物の種々の環境における構造、相状態、熱力学的性質および電子状態を解明するとともに、溶液中でのアクチノイドと有機配位子との反応機構を解明し、新しいアクチノイドの分離法の開発を目指して、アクチノイド科学研究グループは、アクチノイド酸化物、窒化物の相状態、化学ポテンシャル、不定比性等の熱力学的性質の解明を進め、また抽出分離化学

研究グループは、溶液化学的再処理法の抽出分離技術の高度化を進めるとともに、オメガ計画における実高レベル放射性廃棄物の4群分離ホット実験の実施、群分離プロセスの改良、群分離データベースの整備、高度分離抽出剤の開発に取り組んだ。これらの開発研究は、それぞれその目的を極めて高いレベルで達成していると評価される。

①アクチノイド科学研究グループ:Pu系酸化物の酸素ポテンシャルの測定技術の開発とそれを用いて取得した、Pu-Zr-O系のデータ、U、Np、Pu含有酸化物の相状態、熱膨張率、比熱容量、電気伝導率等のデータや、メスバウア分光法、放射光X線吸収微細構造(EXAFS)測定法を用いて得たNp化合物の構造・物性のデータは、アクチノイド科学の進展に貢献するだけでなく、革新的燃料や廃棄物処分技術の開発に不可欠であり、学術的意義が大きく、これらの成果は高く評価される。また、Am、Cmの窒化物の酸化物からの炭素熱還元法による合成の、世界ではじめての成功は、核変換用燃料および核変換ターゲットの製造の基礎を与え、当初の予想以上の成果である。さらに、合成された窒化物の相互固溶挙動や化学的安定性のデータは、燃料の高燃焼度化、プルサーマル、分離変換、乾式再処理等の新しい原子力システムの開発に資し、極めて有用である。溶融塩化物の高温EXAFS測定とそのデータの分子動力学的計算を組み合わせた溶融塩の局所構造と物性の予測の成功は、当初の予想レベル以上で高く評価される。

②抽出分離化学研究グループ:高レベル放射性廃液(HLW)の4群分離法の、実廃液ホット試験、濃縮実廃液を用いる確証試験、および4群分離プロセスの最適化と総合評価による有効性の実証は、当初の目的通り達成されている。放射光実験等により取得した抽出剤や、反応場の分子設計に必要な構造データに基づく、アクチノイド等を高効率で分離・抽出する新規抽出剤TODGAの開発の成功は、当初の予想以上であり、極めて高く評価される。また、TODGA、モノアミド抽出剤を用いて構築された、廃棄物発生量低減化・核拡散抵抗性に優れた、新しい概念の使用済み核燃料再処理プロセス(ARTISTプロセス)は、将来の革新的原子力エネルギー系統の創造の可能性を与えると期待される。さらに、TODGAの抽出特性および耐放射線性を解明し、モノアミドとの混合溶液がTODGAの耐放射線性と抽出容量を向上させること明らかにしている。

(b) 研究開発実施経過の妥当性 (評価点 4.1)

研究開発課題の目的達成度が極めて高いレベルにあると評価されていることから、研究開発実施経過は、物質科学研究院内で、手厚く研究資源の配

分を受けており、原研に特有のアクチノイド取扱施設などの他機関との共同、協力にも努力の跡が見え、特に問題ないと判断される。

- ①アクチノイド化学研究グループ：このグループは、核変換用燃料に係わる Am, Cm 窒化物の高温化学データ、乾式再処理に係わる溶融塩物性と溶融塩中希土類元素の電気化学特性データなどの取得、評価を最重点としていて、このことが目的達成度を高くしたと判断される。また、平成 14 年度からは、文科省公募研究「窒化物燃料と乾式再処理に基づく核燃料サイクルに関する技術開発」を 5 年計画で受託し、上記研究活動を活発化している。
- ②抽出分離化学研究グループ：このグループは、溶液化学、金属錯体の構造化学および錯体の電子状態、動的構造の計算化学の知見を駆使して、新規抽出剤の開発を進め、世界最高の効率でアクチノイドを抽出できる抽出剤 (TODGA) の開発に成功したことが、優れた成果を達成した要因と判断される。そのことが同抽出剤を利用する使用済み核燃料の処理プロセス (ARTIST) の開発の成功に至ったと高く評価される。

(c) 人材の育成 (評価点 3.9)

本主要課題領域では、博士研究員の受入数は毎年 1 名程度で、他方、特研究生の受入数は年平均 5 名である。また、リサーチフェローや外来研究員をも受け入れていて人材の確保と育成に貢献していると評価される。特に、大学では取扱いが困難なアクチノイド物質の基礎的研究に、大学院生を積極的に受け入れ、研究活動の活発化を図られた点は典型的な人材の育成であると高く評価される。

(d) 研究開発の成果の普及・波及効果 (評価点 4.5)

本主要課題領域における研究開発の成果は、そのほとんどが学術論文として公表され、全体として、約 1.5 報／年・人であり、成果公開・普及状況は、その役割を果たしていると評価される。また、国際会議等での招待講演としての発表や特許の公開もそれぞれ年平均 2 件あり、高いレベルのパフォーマンスを示している。

アクチノイドの研究は、世界で 4箇所、日本では原研でしか実施できない特殊な状況で、この分野内での波及効果の評価は困難であるが、核変換に関する研究成果は、原子力の明るい将来の一つであり、波及効果が期待できると判断される。

(e) 将来への研究開発の展開 (評価点 4.0)

本研究評価の対象期間中に得られた研究開発成果に対する自己評価に基

づき、平成 15 年度から始まった次期 5 カ年の研究開発計画が策定されている。この主要課題領域の 2 グループが進めてきた主要課題は、主要課題領域 III の主要課題 III-1、III-2 として、超ウラン元素化合物の固体系、溶融塩系の物性研究の成果を発展させて、核変換や乾式再処理に必要なデータの取得、またアクチノイドの溶液化学的特性の精緻解明、ARTIST プロセスの概念の完成とプロセスの経済性、導入効果の総合的評価等を推進するため、新たに展開する。その研究開発課題の構成は下記の通りである。

主要課題領域 III：アクチノイド・重元素科学の研究

重元素基礎科学、分離化学研究およびアクチノイド固体、溶融塩科学研究を進める。

主要課題 III-1 ; f 元素・重元素化学系の構造・反応制御研究

主要課題 III-2 ; アクチノイド凝縮系の物性研究

これらの主要研究課題は、平成 14 年度実施された事前課題評価で極めて高い評価を得ている。

4.4 施設開発・運転管理（主要課題領域 IV）

(a) 研究支援業務の実績・成果（評価点 4.5）

加速器管理室メンバーは、物質科学研究を支える高エネルギーイオン源としてのタンデム加速器の効率的な運転と性能改善を目的として、タンデム加速器の運転、年間スケジュールの立案や協力研究の調整業務を実施するとともに、制御系計算機の老朽化対策、制御機器の数値制御方式のための電源の開発、タンデム加速器による希ガスイオン加速用の正イオン源の開発、高圧超純水洗浄法適用による耐高電圧特性の改善を実施している。具体的な内容は、年間約 200 日(約 4,600 時間)の運転に基づく、原子核科学、物質科学の研究支援、磁場値制御のスイッチング電源の開発・高性能化・省消費電力化、ガス流量制御と希ガス処理用真空系の改良による正イオン源の整備に基づく希ガスイオンの加速の成功等、極めて広範囲に及ぶにもかかわらず、課題により良く対応していて、その目的達成度は極めて高いと評価される。

(b) 研究支援業務の進め方の妥当性（評価点 4.1）

業務計画の作成プロセス、研究支援業務遂行のための資源投入、人員配置、他機関との協力・連携のあり方等は、いずれも妥当と評価される。また、タンデム加速器の性能維持のために加速管洗浄などの思い切った対策を施し

成功させるなどは、極めて高く評価される。さらに、タンデム加速器による世界初の希ガスイオン加速用の正イオン源の開発、搭載も、その利用範囲を拡大する効果があり極めて妥当である。他方、施設開発に対応する予算の計上などに一層の努力が必要と判断される。

(c) 人材育成および士気確保の措置 (評価点 3.6)

加速器の運転管理のための人員配置に関して、高年齢化する技術系職員に代わり加速器の運転委託を行い、安定かつ安全な運転体制を維持されているが、加速器の性能の維持・確保は研究の進展に直接影響するので、熟練と経験を積んだ技術者が必要であると判断されるので、支援技術のレベル維持のための計画的な人員の採用と育成が望まれる。また、原研特有の大型設備の開放は原研の重要な機能の一つであると判断されるので、それを支援する技術者の士気を確保するためには、研究費とは区別して「施設開発、創意工夫経費」の定常的な計上が望まれる。

(d) 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果 (評価点 4.1)

特徴ある大型設備は、開放により多くの研究者に利用されて初めて、科学技術の進展に貢献できるとの観点に立つと、中核研究機関の原研はその運転管理者に、明確な位置付けと士気高揚の支援を、供与すべきであり、また努力すべきである。また、原子力は、核変換や融合炉など、多様な将来像を探求する時期にあり、広範な核データを取れる体制が肝要である。そのような意味で、原研のタンデム、ブースター加速器はわが国の科学技術の進展への寄与とその成果の波及をもたらすと期待される。

4.5 その他の所見

上記以外の所感、問題点、提言等、各委員からのコメントを以下に列記する。

- ①研究開発といえども、国から研究費を支給され、それに見合う成果を出すことが要求されていると考えると、研究開発業務の効率を向上させることは重要である。「研究開発における業務効率とは何か」に明快に答えることは難しいことであるが、何らかの回答を見出す努力をし、研究評価にも「業務効率」の視点を取り入れるべきであると思う。

②原研だからできる研究が多く行われており、それらはどれも大変重要な成果をあげている。他方では、原研の優位性、特殊性と関係のない研究は、人材の厚みなどで他の研究拠点にかなう訳はなく、また、その必要もない。この点を政策的に生かして今後の運営を図られたい。

③これだけの研究成果を上げている割には、特許等知的財産保有の意識が非常に低いように思われる。今後、知的財産所有権等の取得にも心がけるよう計らってもらいたいと思う。

次期 5 カ年研究開発計画への展開については、昨年の物質科学研究部の研究開発課題（平成 14 年度事前評価：1 次評価用資料）に物質科学研究部より提案された全てのテーマが有効に実施されることを切に望む。

人材養成等について、基礎研究部門である物質科学研究部が果たすべき重要な役割の一つとして、「次世代の原子力開発を担う専門家の育成」があるということを認識されて努力されていることに敬意を払いたいと思う。しかし、実績的には、今一步の進展が望まれる。

④原研における研究は、今までのところ、原子力研究開発における物質科学研究の重要性に鑑み、原研における物質科学研究を大きく 2 つに分けている。すなわち、原子力開発に直接関わるいわゆるミッション研究とそれから派生して社会への貢献をめざした社会貢献研究の 2 つである。これらを基盤として、限りある予算と人的資源ならびに過去の研究の流れを踏まえ、研究分野を 4 つの主要課題領域にくくり、4 つの各領域にそれぞれ目標を設定し、成果を競わせている。その結果、これら各領域における研究開発成果の公表が短期間で数多くなされている。成果の公表には濃淡があるが、予算と人的配置を考えると良く上がっているといえる。また今後の展開も過去の評価を踏まえよく考えられている。問題点を挙げれば次の通りである。

- 1) ミッション研究と社会貢献研究の間に整合性が欠ける領域がある。
- 2) 4 つの主要課題研究領域の設定とその人的配置に過去の歴史が投影されていて、それが成果の公表の濃淡として現れている。
- 3) 成果の活用を積極的に図られたい。
- 4) 所外の研究者との交流や研究機関との連携を一層図られたい。
- 5) 1)については、JJ 統合もあり、今後の課題として熟考されたい。
- 6) 次回の評価では、定量的な評価を行えるよう準備されたい。

⑤実施されている研究は、個々に見れば、それぞれに意義が認められるが、

その評価に当たっては、全体的な観点、わが国の中核的機関としての原研、その中の物質科学研究部に対して期待されている役割の観点からも良く検討する必要があると考えられる。

次期計画で「世界に誇れる成果を目指す。」ということであるが、研究論文ばかりではなく、例えば規制のバックデータなどについても一定の貢献が期待されていると考えられる。(研究論文ばかりが尊重され、規制のバックデータなどについては海外に依存するようなことでは、フロントランナーとは言えない。)

研究の進展に当たっては、その基盤を整備することが重要であるが、この面では一層の努力が望まれる。例えば、アクチノイド試料については、当面の試料は入手しているとのことであるが、核変換のための核データについては、入手の困難な試料もあるので、組織的な対応が必要である。(入手の容易なものだけの計画であれば、それ以上の成果は望むべくもなく、核変換の実現を目指しているとは言えない。)

⑥限られた予算、人員で世界トップレベルの研究開発を行うには、テーマの選定と外部機関との連携が重要である。外部の人に来所してもらうだけでなく、共同研究のため原研の人と装置が一定期間大学などへ移り、共同研究するような新しい仕組みなどを提案したい。

⑦最近、物質科学研究に関連する重要な問題が2件マスコミで取り上げられている。その一つは、軽水炉のシュラウドのひび割れである。これまでに得てきた中性子照射された鉄鋼材料の研究成果を、このひび割れに対する技術的な対処に、可能性があるなら、積極的に活かして頂ければと思う。これも原研が社会に対して果たし得る役割の一つ(成果の社会への還元)と考える。

もう一つは、軽水炉の使用済み燃料の処理・処分とそれにより排出される放射性廃棄物の処分に、今後20年間で19兆円が見込まれるという記事である。これを電気代に組み込めば、経済的に原子力(軽水炉)発電の優位性が、他の発電システムに比べて、無くなることである。原子力には、経済性以外にも多くの利点があり、また、当然核燃料サイクルの研究が20年間に進展することが予測される。原研は、これについても、将来に備えて研究開発している立場から、積極的に意見を述べる責任を負っていると判断される。国の代表機関は、これまで事故等が起きた時に求められてその原因等についてコメント等を行ってきた。今後は、将来の技術に関する問題には積極的に係わるべきであると思う。このような技術的な

開発状況の発信が社会における原子力の受容性の形成に繋がると考える。

- ⑧研究開発課題目標の達成度は、課題遂行のための資金と人的資源に大きく依存する。原研は、国の中核研究機関として、比較的大枠の予算の獲得に努力され、それを実現されている。人的資源に関して、最近の若手研究者の採用では、まず、ポスドクとして採用し、その後の評価を経て、所員として採用する方策が取られている。他方、研究開発の推進を担うリーダー格は、原研内のみから人選されているように見受けれる。人事交流の活性化のため、原研から外部機関への人材の転出が行われているのであるから、リーダー格の選定は、少なくとも原研内外からの公募による採用を実施されることを望む。このような方策は、研究開発目標の達成度を高めるだけでなく、それにより他機関にも波及効果をもたらし、国全体の人的交流を活性化すると期待される。
- ⑨目標とした成果が多く得られているのに比し、特許などの知的所有権の取得数が少ない理由として、基礎研究部門に伝統的に存在する「特許取得よりも論文発表による情報公開を重視する」考え方の一要因であるとされている。いままではそれで良いとしても、今後は、原研、自体が、研究者が特許取得を容易にでき、かつ、大学などではTL0室を設置しているのと同様に研究者の負担を軽くし、さらに刺戟するようなシステムを積極的に設けていくべきだと考える。

別表 物質科学研究専門部会（平成15年度事後評価）評価点一覧

1. 研究開発課題

評価項目 主要課題領域		a) 研究開発課題の目的達成度	b) 研究開発実施経過の妥当性	c) 人材育成	d) 研究開発の成果の普及・波及効果	e) 将来への研究開発の展開
I	放射線場物質科学	4.5	4.0	3.5	4.4	4.0
II	極限物性・新材料科学	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8
III	アクチノイド科学	4.6	4.1	3.9	4.5	4.0

2. 研究支援業務

評価項目 主要課題領域		a) 研究支援業務の実績・成果	b) 研究支援業務の進め方の妥当性	c) 人材育成及び士気確保の措置	d) 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果
IV	施設開発・運転管理	4.5	4.1	3.6	4.1

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クロトン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	1 cal = 4.18605 J(計量法)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.184 J(熱化学)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁶	= 4.1855 J(15 °C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	仕事率 1 PS(仮馬力)
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1
3.7 × 10 ¹⁰	0.01	1

吸収線量	Gy	rad
0.01	100	1

照射線量	C/kg	R
2.58 × 10 ⁻⁴	1	1

線量当量	Sv	rem
0.01	100	1

(86年12月26日現在)

物質科学研究専門部会評価結果報告書(平成15年度事後評価)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。