

JAERI-Review



JP0350379

2003-016



放射線利用研究専門部会評価結果報告書  
(平成14年度事後評価)

2003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）で複写による実費領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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

放射線利用研究専門部会評価結果報告書  
(平成 14 年度事後評価)

日本原子力研究所  
研究評価委員会

(2003 年 4 月 1 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、放射線利用研究専門部会を設置し、高崎研究所における材料開発部の平成 13 年度までの 5 年間の研究開発実績、及び、環境・資源利用研究部（現・イオンビーム生物応用研究部）、放射線高度利用センターの平成 13 年度までの 4 年間の研究開発実績について、事後評価を実施した。同専門部会は、10 名の外部専門家で構成された。

放射線利用研究専門部会は、平成 14 年 11 月から平成 15 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 14 年 12 月 24 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、研究評価委員会に提出され平成 15 年 3 月 7 日に審議された。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 Radiation Application Research  
(Result Evaluation in Fiscal Year 2002)

Research Evaluation Committee

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

(Received April 1, 2003)

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 Radiation Application 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 accomplishments of the R&D achieved for five years until Fiscal Year 2001 at Department of Material Development, and the accomplishments of the R&D achieved for four years until Fiscal Year 2001 at Department of Radiation Research for Environment and Resources and at Advanced Radiation Technology Center in Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment of JAERI. The Ad Hoc Review Committee consisted of ten specialists from outside of JAERI.

The Ad Hoc Review Committee conducted its activities from November 2002 to February 2003. 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 December 24, 2002, 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 7, 2003.

This report describes the result of the evaluation by the Ad Hoc Review Committee on Radiation Application Research.

Keywords : Evaluation of Research and Development, Result Evaluation, Radiation Application Research

## 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、高崎研究所の材料開発部、環境・資源利用研究部（現・イオンビーム生物応用研究部）、放射線高度利用センターの平成13年度までの5年間（一部4年間）の研究開発実績について事後評価を実施するため、「放射線利用研究専門部会」を平成14年9月30日に設置した。

放射線利用研究専門部会は、10名の外部専門家で構成され（部会長：石榑顯吉・埼玉工業大学教授）、部会会合は平成14年12月24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事後評価の方法に従って行われた。同専門部会は、評価結果を「放射線利用研究専門部会評価結果報告書（平成14年度事後評価）」として取りまとめ、研究評価委員会に提出した。

研究評価委員会は、平成15年3月7日に第10回会合を開催し、同専門部会から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た。これに基づき、研究評価委員会委員長は、同報告書を平成15年3月12日付けにて日本原子力研究所理事長に答申した。

平成 14 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 青木 輝行 電気事業連合会原子力開発対策委員会委員長

〃 秋元 勇巳 三菱マテリアル(株)取締役会長

〃 石榑 顯吉 埼玉工業大学先端科学研究所教授、東京大学名誉教授

〃 井上 信 京都大学原子炉実験所長・教授

〃 菊田 惕志 (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 東京大学生産技術研究所教授

〃 斎藤 鐵哉 物質・材料研究機構理事

〃 田中 知 東京大学大学院工学系研究科教授

〃 藤原 正巳 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 3 月 7 日現在)

**放射線利用研究専門部会評価結果報告書**  
**(平成 14 年度事後評価)**

平成 15 年 2 月

日本原子力研究所  
研究評価委員会  
放射線利用研究専門部会

This is a blank page.

## 目 次

## はじめに

## 総合所見

1. 専門部会の目的 .....	1
2. 評価方法 .....	1
2.1 専門部会の構成 .....	1
2.2 事後評価対象研究開発課題 .....	1
2.3 専門部会会合の開催 .....	2
2.4 評価項目及び評価基準 .....	3
3. 評価対象研究開発課題の概要と評価結果 .....	5
3.1 高崎研究所における研究開発 .....	5
3.1.1 高崎研究所における放射線利用研究開発の概要 .....	5
3.1.2 所見 .....	9
3.2 材料開発部の研究開発 .....	11
3.2.1 研究開発課題の概要 .....	11
3.2.2 評価結果 .....	22
3.3 環境・資源利用研究部の研究開発 .....	27
3.3.1 研究開発課題の概要 .....	27
3.3.2 評価結果 .....	38
3.4 放射線高度利用センターの研究開発 .....	43
3.4.1 研究開発課題の概要 .....	43
3.4.2 評価結果 .....	50
別表 放射線利用研究専門部会評価結果（評点）一覧 .....	54

## Contents

## Introduction

## Executive Summary

1. Purpose of the Ad Hoc Review Committee .....	1
2. Evaluation Method .....	1
2.1 Organization of the Ad Hoc Review Committee .....	1
2.2 R&D Subjects for Result Evaluation .....	1
2.3 Ad Hoc Review Committee Meeting .....	2
2.4 Items and Criteria for the Evaluation .....	3
3. Outline of the R&D Subjects for the Evaluation and Results of the Evaluation .....	5
3.1 R&D Achievements at Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment .....	5
3.1.1 Outline of the R&D Achievements at Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment .....	5
3.1.2 Comments .....	9
3.2 R&D Achievements at Department of Material Development .....	11
3.2.1 Outline of the R&D Achievements .....	11
3.2.2 Results of the Evaluation .....	22
3.3 R&D Achievements at Department of Radiation Research for Environment and Resources .....	27
3.3.1 Outline of the R&D Achievements .....	27
3.3.2 Results of the Evaluation .....	38
3.4 R&D Achievements at Advanced Radiation Technology Center .....	43
3.4.1 Outline of the R&D Achievements .....	43
3.4.2 Results of the Evaluation .....	50
Attached Table : Evaluation Result List of the Ad Hoc Review Committee on Radiation Application Research .....	54

## はじめに

研究評価委員会放射線利用研究専門部会は、高崎研究所における材料開発部の平成13年度までの5年間の研究開発実績、及び、環境・資源利用研究部（現・イオンビーム生物応用研究部）、放射線高度利用センターの平成13年度までの4年間の研究開発実績を事後評価するために研究評価委員会の下に設置され、同委員会の定めた基本的要領に則って平成14年11月から平成15年3月にかけてこの研究評価活動を実施した。

既に高崎研究所は、平成14年度からの5年間の研究開発計画について、平成13年度に事前評価を受けており、今回は、前述のように、その直前の4—5年間の活動を事後評価するものである。この時期は、平成5年に運転を開始したTIARAを用いたイオンビーム利用の研究開発の始動時期に当っており、長い歴史と多くの実績を持つガンマ線、電子線の利用とバランスを取りながらイオンビーム利用の研究開発を立ち上げ、各々の特徴を生かしつつ成果を上げていくことが出来たかどうかが重要なポイントであると考えた。また、今回の評価が、原子力研究所と核燃料サイクル開発機構との統合を目前にひかえ、設立される新法人における放射線利用の研究開発のあり方を検討する上で役立つ事が出来ればと考えた。

当専門部会の審議においては、まず原研から各研究開発課題評価用資料の提出を受け、それをレビューし、記載内容についての質問等を含む1次評価を行い、これを被評価側に提示した。この1次評価により、追加の説明資料を含めて、原研側の部会会合への準備が的確に行われた。12月24日に開催された部会会合では、各研究分野の責任者から説明を受け、質疑討論を行った。これらに基づいて、各委員が2次評価を行い、その結果を事務局に提出した。各委員の評価結果は事務局が取りまとめ、部会長が報告書の原案を作成した。報告書の作成に当たっては、各委員からの率直なコメント等を踏まえて全体の総意を明らかにするとともに、貴重な少数意見も記載した。その各論での評価所見を要約し、冒頭の総合所見を部会長が取りまとめた。この部会長原案を全員がレビューし、内容の確認、修正を経て最終報告書とした。

終わりに、限られた期間ではあったが、委員全員の集中的な審議を踏まえた評価の結果、本報告書をまとめることができたことに対し、委員各位のご協力に深甚なる謝意を表する。また、本評価結果が今後の原研の研究開発運営の一助となれば幸いである。

平成15年2月20日  
放射線利用研究専門部会  
部会長 石榑 顯吉

## 総合所見

原研高崎研究所は、多くの実績を有する電子線などによる放射線利用技術開発と、新たに加わったイオンビームを中心とした先端的基盤研究をとおして、工業利用、農業利用、環境保全への応用などを中心に放射線利用に係る実用的研究成果を生み出し、我が国の産業の発展に貢献してきた。これまでの成果を基に、現在は、研究開発計画の目標を、環境、機能材料、バイオ技術と医療の3分野への貢献に焦点を当て、新たな放射線利用の途を拓くことを目指して、材料開発部、イオンビーム生物応用研究部（旧・環境・資源利用研究部）及び放射線高度利用センターの3部門による連携・統合的研究運営を継続している。特に、イオンビームを利用した材料・バイオ技術分野における先端的研究開発を重点的に推進するとともに、長期的観点から国家的・社会的ニーズが高い環境分野において、材料・バイオ技術の両面から環境保全・環境浄化を目指した放射線利用研究を進め、必要な基礎研究と基盤技術の高度化及び新技術開発等の展開を図っている。

今回の事後評価では、ガンマ線、電子線の利用ばかりでなく、イオンビームの利用分野においても、実用化の段階に到達したもの、あるいは極めてそれに近いものが数多く存在し、ガンマ線、電子線の利用においてはベンチャー企業の設立にまで到っている事が高く評価された。この成果を達成するにあたっては、活発に進められた産学との研究等を通しての連携が重要な役割を果たしていると認められた。

今後とも、産学官の連携を密にし、放射線利用のシーズ開拓と社会的ニーズに応える中核的研究機関として、萌芽から実用に向けた技術の醸成に至るまでの先導的役割を果たすことが期待できる。

### 1. 高崎研究所における放射線利用研究開発

実用化を見据えたイオンビーム利用を中心とする放射線利用研究がこの時期の高崎研究所の重要なミッションと考えるが、概ねその方向へ向けて展開されており、重要な成果も得られている。高崎研究所では、現在、材料研究とイオンビームの生物応用研究が主要な領域となっており、これは妥当な選択である。高崎研究所ならではの研究が基礎、応用を問わず、全般にしっかりと行われており、設定された目標は達成されている。なかでも、バイオ分野の展開には目を見張るものがある。このことは、これまでに至る10年の努力があったことによるものであり、この点に留意すべきである。新しい分野の育成には長期間を要するので、じっくりと育てる事が重要であることを十分認識する必要がある。ただ、応用的研究が中心とは言え、基礎と応用のバランスを充分考える必要があり、テーマによってはこのバランスに欠ける印象を受けるものもある。余りに応用にはしたことなく、基礎的な面での体系化を考えることも重要である。

また、事後評価を今後の研究に有益なものとするためには、目標を達成するまでの経緯、特に、当初設定した目標の中で達成されなかった事例について、不成功の原因等につき分析を充分行い、当初の狙い・方法・結果（到達点、求められる技術的課題）等を整理して記録として残しておくことが失敗に学ぶ意味で極めて重要であり、将来の研究・開発に資

することになる。うまくいかなかった事例は、貴重な教訓を含んでいるにも関わらず、これまでには関係者の範囲内に留められ、他の研究者に伝わらない事が多いので、記録として残すことが重要である。いずれにしろ、貴重なデータが数多く蓄積されているので、これらを将来に生かすためにも検索機能の充実した、使いやすいデータベースを各分野で構築することが望まれる。

今後の研究実施に当たっては、さらに以下の事柄への対応を要望する。

- 1) 原研高崎研究所のバイオ分野、材料分野での成果・技術開発には、めざましいものがあり、また、それを支えた放射線高度利用センターの業績も含め、いずれも高く評価できる。これらの成果を、総合的に相乗効果をもって環境の世紀に活用し新産業創出につなげるためには、どのような方策、体制、組織、資源配分、内外連携が適当か、知恵を結集し、産官学共同による研究開発をさらに積極化させることが望ましい。今後も物理・化学・生物のプロ集団が、応用開発を行う高崎研究所の面目躍如となる成果を生み出すことを期待する。そのためには、人材も含めて、研究資源のフレキシブルな活用がよりいっそう必要となる。
- 2) 原研高崎研究所は新産業創出のシーズを多数保有している。技術移転とベンチャー育成に一層の努力を払って欲しい。放射線利用研究報告会なみの密度の濃い情報まで、インターネットで手軽に入手でき積極的にアピールできる方策として、「技術移転の案内」を充実させることが重要である。更に潜在顧客を獲得できる新たなシステムに発展させることで、より産業利用のチャンスが増すと思われる。「わかりやすく」「可能性・発展性をイメージできる」「アイデアを誘起させやすい」プレゼンテーションがいつでも見ることが出来る方策、また、アイデア源泉、シーズ源泉としてアクセスできるシステムがあり、かつそれを皆に知らせるシステムがあると良い。
- 3) 材料分野、生物応用分野とともに、GeV級加速器は大変有効であり、原研高崎研究所単独、あるいは広域協力連携などにより、今後とも開かれた利用が可能となる方策が必要である。
- 4) 生活環境の向上に役立つ応用研究は重要で、放射線利用をさらに進め、一般からの支持を得るためにも重要である。応用面に関しては、他の色々な技術を有する部署と連携し、実用面からみた自分達の技術の位置づけをしっかりと掴んで、技術のプライオリティが活かせる方向へ進んでもらいたい。

## 2. 材料開発部の研究開発

材料開発部は、宇宙開発や情報通信基盤技術などに役立つ次世代の半導体材料・素子、電子デバイス、マイクロマシン部品などのナノテクノロジーを応用した創製技術の開発、環境浄化や省エネルギー技術として広範な分野への貢献が期待されている光触媒薄膜材料、燃料電池用材料、高耐熱・高強度材料、高耐放射線性材料、セラミック複合材料等の先端的な高機能新素材・新材料の創製に取り組んでいる。

特に、イオン穿孔法を活かしたナノ電子デバイスの開発、イオンビーム蒸着による自己

組織化を活かしたナノワイヤや磁気素子の開発、イオンビーム加工を活かした超微細医療用線源の開発などのナノテクノロジーを中心として材料創製研究を行っている。

また、エネルギー資源や工業資源などの安定供給を確保するため、海水中に豊富に溶存しているニッケルやマンガンなどの希少金属を捕集する技術開発を進め、資源の確保と有効利用を図っている。

これらの実用段階に達した技術は、ベンチャー企業化や民間への移転を積極的に推進し、新産業創出による社会への貢献を目指している。

平成13年度までの5年間の研究開発として、環境応答性膜、分離機能材料、エコマテリアルなどの研究は、ほぼ当初予定された成果が得られ、いずれの課題も、高度化された技術を基盤に応用目的を達成し、全体に優れた達成度であると評価できる。同時に、副次的に得られた成果も高く評価できる。なかでも、高性能燃料電池膜の開発における市販膜の3倍のイオン交換容量達成の成果、有用金属捕集技術の開発における実海域試験でのウラン1kg捕集達成の成果は高く評価できる。また、半導体材料、陽電子ビームの利用研究も顕著な研究実績をあげており、目的達成度は高い。耐放射線性材料（有機及び半導体）の研究は高崎研究所が長年手がけてきたテーマであり、陽電子ビームにおいては分析技術の開発においてその成果は大きい。有機材料、原子炉用電線の研究の成果も十分である。耐放射線性の半導体材料・素子の開発と、宇宙用半導体の耐放射線性評価技術の開発などは、トランジスタ試作まで進み、世界に誇れる、優れた成果をあげており評価できる。

反面、無機機能材料については創製された材料の機能性を評価する試験が必ずしも充分ではなかった。また、新規性に富んだ基盤技術も少なく、さらなる進展が望まれる。さらに、原子力耐環境材料の開発は思い付きによる雑多な技術開発となっている印象を与え、組織的な開発戦略が見えない傾向にあるので、これを明確にして進めることが必要である。

人材育成については、共同、協力研究に加え、群馬大学との連携大学院による人事交流を通じて人材育成に寄与している状況を評価するが、放射線環境材料評価の分野では特研生、外来研究員の数の減少が見られ、やや弱体化の傾向があるのではないかと危惧する。有機材料系の研究者の減少は今後の研究展開に対し少なからず問題を残すことも予想される。組織変更などの環境変化に応じたフレキシブルな人材交流・育成がより必要となろう。放射線利用の研究開発が可能な研究機関は限られているので、もっと積極的な人材育成体制が必要ではないかと感ずる。

今後の研究実施に当たっては、さらに以下のことを要望する。

- 1) 材料創製は、心身の健康の増進、福祉介護、携帯電話・自動車などの巨大産業への展開が望める分野であり、大きな経済効果、社会効果が期待できる。今後は信頼性の高い経済性評価に基づいた、一層のコスト低減のための研究開発を進めて欲しい。
- 2) イオン穿孔でのナノ部品開発は、今後期待される分野である。せっかくの技術開発を無駄にしないよう、実用化を着実に進展させることを期待する。
- 3) ハイドログル創傷被覆材など、すでに具体的な実用化が始まったものもあるが、「分

子ふるい」のバイオ・医薬応用も大きな社会的・経済的効用が望める。実用化への課題を着実に解決し、産業に結びつけて欲しい。

- 4) 耐放射線性の素子やセンサーは原子力産業における遠隔システムの開発に強いニーズがある。宇宙利用でのニーズのみならず、地上でのニーズもよく把握した上で、次期計画も積極的な展開を図って欲しい。
- 5) 陽電子ビーム利用技術を発展させることは広い範囲で意義のあることである。他の研究機関では実施しにくいテーマであるので、新産業創出、大きな経済効果に結びつけて欲しい。
- 6) 原子炉用電線の経年変化は原子力発電プラントの高経年化対応にとって重要な課題である。これまでの研究成果を評価するが、これが社会的には余り見えていない気がする。この面での国のプロジェクト研究が開始されており、高崎研究所の成果の有効利用を図る方策、貢献の仕方について、もう一度良く検討し直すべきである。さらに、有機材料、原子炉用電線ケーブルなど、様々な課題の取り組みについてデータベース化しておくことが望まれる。

### 3. 環境・資源利用研究部の研究開発

環境・資源利用研究部（現・イオンビーム生物応用研究部）は、排ガスや廃水等に含まれる汚染物質の無害化や、有害物質の除去に必要な処理技術や新浄化材料の開発、及び環境適合性の高い生分解性材料の開発などを進め、環境の保全と浄化に貢献するとともに、汚染環境を積極的に浄化する手段として、ポジトロンイメージング技術やイオンビーム育種技術を活用して、環境浄化植物の創成に取り組んでいる。

また、原研が開発したイオンビーム育種技術を用い、食糧の安定供給に役立つ環境耐性農作物や病害虫に強い植物などの育種を目指して新しい植物資源の作出を行っている。このため特殊なイオン照射技術を必要とするバイオ研究に最も適した超伝導 AVF サイクロトロンの建設を計画している。

さらに、食品照射による便益、必要性、安全性についてのわかりやすい情報提供を行うため、食品照射に関するデータベースの整備を進めている。また、照射食品の流通・販売の透明性を確保するため、照射食品や照射原料を用いた加工食品の検知技術の開発に取り組んでいる。

医療・福祉の分野では、イオンビームを用いたステントの開発など、新しい医療用 RI 線源や診断・治療用の放射性医薬品の開発に貢献するとともに、地域協力を目指した超伝導 AVF サイクロトロンの医学利用についても検討を行っている。また、高分子材料の改質技術等を応用することにより、高齢者にやさしい新素材やアメニティ製品用材料の開発に取り組んでいる。

平成 13 年度までの 4 年間の研究開発として、電子線を用いた環境汚染物の分解機構の解明など、研究開発が確実に進んでおり、実用性も含めて、目的達成度は高い。なかでも、揮発性有機化合物の研究は大きな成果が得られている。また、排煙・ダイオキシンの浄化

プロセスの開発における平成11年度地球環境技術賞受賞、ダイオキシン90%分解（高浜クリーンセンター）などの成果はすばらしい。今後、燃焼排煙処理技術は民間への技術移転が終わったとした上で、なお原研が実施すべき課題を明確にして進めることが重要である。植物資源創生研究では、イオンビーム特有の突然変異誘発機構の解明、細胞加工技術が進み、これまでになかった新形質をもつ素材の開発や新品種の育成など、世界に先駆けた成果を基礎面、応用面ともにあげており、高く評価できる。重イオンシングルヒットの影響を明らかにしたことは大きな成果である。ポジトロンイメージングによる環境応答の解明は成果を確実に積み重ねている。植物PET（ポジトロン断層撮影）の有効性が多くの研究者によって認識されるとともに、共同利用者が増加をしていることは高く評価できる。その有効性は世界的にも高い評価を得ている。

但し、人材育成の面では、積極的な実用化への取り組みによる人事交流や学生実習の受け入れはあるものの、人材育成の努力は余り感じられない。環境保全技術開発関連の研究者や、対象としている分野が、やや縮小気味なのが気になる。環境関連のテーマは幅広い分野の知識が必要であり、人材的に、一層の交流を図って、将来の実用化に向けての対外的な協力関係の強化と、人材育成に積極的な姿勢が望まれる。また、イオンビームの生物応用は今後の大きな発展が期待される分野であり、基礎部分は大学、応用部分は企業と、メリハリをつけて、さらなる人材育成への努力をお願いしたい。

今後の研究実施に当たっては、さらに以下のことを要望する。

- 1) ダイオキシンの電子ビーム分解、燃焼排煙処理技術などは、実用化しつつあるものを確実に世の中に定着させて欲しい。実用プラント建設への適用にはさらに社会的受容性に関する障害があるように見える。これをどう克服するかが課題であろう。さらに水への応用も重要であるが、既に走りだしている水溶液中低分子有機化合物の放射線分解に関する研究の意義と狙いを明確にして進めることが重要である。
- 2) バイオ技術分野のラジオマイクロサージェリ技術は、新たなバイオ産業の展開が期待できる開発であり、具体化を期待する。
- 3) 医学・生物学、環境応用は、原研高崎研究所の意義を人々に実感してもらうのに効果的である。この分野は高崎研究所のイオンビーム利用研究の大きな特徴である。余りに応用にはすることなく基礎データの収集も含めたドッシリとした研究の展開を希望する。
- 4) 培養細胞系とイオンビームを組み合わせた突然変異品種の作出では、カーネーションの実用化に成功したことにより、今後の植物育種分野の発展が予想されるが、主要成果として、今後とも品種登録を含めていく必要がある。また、より意図的な突然変異誘導、品種改良につなげていくことが大切である。データベース化による知見の集積・整理と、だれもが利用できるシステムつくりにより、新たな材料、品種での育種が飛躍的にスピードアップできると期待される。
- 5) ポジトロンイメージングでの環境応答研究は劣化環境での食料生産資源創生につながるもので、この方向に集中させる展開を期待する。
- 6) 病気治療にも放射線利用は大きな役割を果たしており、より高精度かつ正常細胞への

損傷の少ない方法が望まれているので、その方向へ、さらに展開されることを期待する。

#### 4. 放射線高度利用センターの研究開発

放射線高度利用センターは、イオンビーム、電子線及びガンマ線による放射線利用研究のための拠点となる各種放射線照射施設の管理・運営及び放射線利用研究に係わるビーム先端技術の研究開発を行っている。放射線照射施設の管理・運営については、イオン照射研究施設(TIARA)を中心として、所外に対して開かれた施設利用の機能を充分に發揮できるように、安定かつ効率的な運転管理に努めている。ビーム先端技術の研究開発については、先端研究のニーズを捉えたイオンビーム技術の研究開発を行うことにより、施設機能の高度化及び先端研究の効果的な推進を図っている。

平成13年度までの4年間の研究開発として、照射性能の向上を目指したサイクロトロンの安定化、植物育種を容易にする大面積均一照射・深度の向上、細胞加工・細胞機能解明などのためのマイクロビーム、シングルイオン照射、微量元素分布測定技術の向上など、施設の円滑かつ効率的な運転管理、ビーム利用の技術開発と施設機能の高度化を図っており、いずれの成果も高く評価できる。TIARAは、稼動当初より開かれた施設として運営されており、共同利用を進めて、成果を挙げている。このシステムは原研の中でも類を見ないもので、高い評価を得ている。過去10年間の研究成果をまとめて公表するなど、外部に対する説明責任を果たす姿勢も評価できる。さらに、研究課題申請等の事務手続きの電子化、合理化が順調に進んでいる。特に外部ユーザーにとって便利で対応しやすいシステムを実現した。運営の効率化へ向けた改善点も評価できる。イオンビーム技術の開発では、マイクロビーム形成技術やシングルヒット技術の開発、大気中にビームを取り出すマイクロPIXE技術の開発など、貴重な成果を挙げており評価できる。

ただ、装置の絶えざる保守、管理と言う業務をいかに魅力あるものとして人材を育成するかについて、さらなる検討の余地はあるようだ。設備技術の継承は研究と比べて、ともすると軽視されがちだが、今後は極めて重要となってくる。是非、組織的なシナリオを作り、専門家の育成に積極的に取り組むとともに、職員の計画的な補充を進め、次期計画の体制作りに備えて欲しい。職員の人材育成は、予算との関係もあり、補充その他、苦労されているのも理解できるが、もっと積極的に取り組むべきである。研究面では色々なアイディアを持った人の配置など、常に人材の新陳代謝を図ることが肝要であり、テーマ、分野に応じた人事交流による人材育成が今後さらに必要である。

今後の研究実施に当たっては、さらに以下のことを要望する。

- 1) 国内の放射線源の老朽化、劣化が進む中で、放射線科学の基本ツールとしての放射線源を維持提供することは、今後益々重要になっていくと思われる。せっかくの運転管理効率化が無駄にならないよう、施設設備の計画的更新、管理システム運営の合理化の更なる推進が必要である（常に効率化を図っていくことが必要）。
- 2) 東北大との共同開発による「大気マイクロPIXE分析技術」は医学、生物学に応用する

具体的方策を見つけ出して、実用化につなげて欲しい。

- 3) ナノテクノロジーなどの材料分野、植物資源創生、バイオ産業展開などの生物応用分野とともに、GeV 級加速器は大変有効である。これまでの蓄積を活かし発展させる形でのGeV 級加速器の開発を期待する。
- 4) 大型設備投資には技術シーズをよく考えた綿密な計画の作成を期待したい。加えて、より小型、低価格のビーム装置の開発が出来ると、放射線利用技術がさらに拡がると思われる所以、是非考慮願いたい。

## 5. その他

環境保全に対する放射線利用技術の分野での成功は、放射線の有用性を理解してもらう上で、極めて有効である。情報の発信を積極的に行って、技術の実用化を目指して欲しい。

## 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、研究評価委員会の放射線利用研究専門部会において、高崎研究所の材料開発部が平成13年度までの過去5年間に実施した研究開発課題、及び、環境・資源利用研究部（現・イオンビーム生物応用研究部）、放射線高度利用センターが平成13年度までの過去4年間に実施した研究開発課題について、事後評価を行う。

## 2. 評価方法

### 2.1 専門部会の構成

部会長	石榑 顕吉	埼玉工業大学先端科学研究所教授、東京大学名誉教授
専門委員	岡村 正愛 勝村 康介 工藤 博 曾我 文宣 中西 友子 濱 義昌 平田 雅規 平山 英夫 水野 彰	キリンビール(株)植物開発研究所主任研究員 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授 筑波大学物理工学系教授 放射線医学総合研究所加速器物理工学部客員研究員 東京大学大学院農学生命科学研究科教授 早稲田大学理工学総合研究センター所長 (株)半導体理工学研究センター研究推進部上級研究員 高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター教授 豊橋技術科学大学エコロジー工学系教授 東京大学大学院工学系研究科教授（併任）

### 2.2 事後評価対象研究開発課題

#### (1) 材料開発部

##### 1) 機能材料創製の研究（主要課題領域1）

- ・有機機能材料創製に関する研究
- ・放射線加工処理に関する技術開発
- ・分離機能材料の開発研究
- ・無機機能材料創製に関する研究
- ・放射線照射利用に関する技術協力

##### 2) 放射線環境材料評価の研究（主要課題領域2）

- ・半導体材料・素子の耐放射線性に関する研究
- ・陽電子ビーム利用技術の開発
- ・有機極限材料の研究
- ・原子炉用電線の経年変化に関する研究

#### (2) 環境・資源利用研究部

##### 1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発（主要課題領域1）

- ・揮発性大気汚染物のエアロゾル化・除去に関する研究
  - ・排煙中ダイオキシンの分解技術の開発
  - ・燃焼排煙処理技術の開発
  - ・水溶液中低分子有機化合物の放射線分解反応の基礎的研究
- 2) 生物資源の利用技術に関する研究（主要課題領域 2）
- ・イオンビームによる植物資源創成の研究
    - 有用遺伝子利用の研究
    - 高度育種技術の開発
  - ・バイオ技術への放射線利用の研究
    - 細胞局部照射効果の研究
    - 放射線耐性機構の研究
    - 食品照射調査・研究
  - ・イオンビームによる生物機能解析の研究
    - 植物の環境応答研究
    - 医学応用研究
- (3) 放射線高度利用センター
- 1) 放射線照射施設の管理・運営（主要課題領域 1）
- ・イオン照射研究施設の管理・運営
  - ・イオン加速器系の運転管理
  - ・照射施設の運転管理
  - ・放射線高度利用研究推進業務
- 2) イオンビーム技術の開発（主要課題領域 2）
- ・マイクロビーム技術
  - ・イオン源・加速器技術
  - ・線量計測技術
  - ・加速器遮蔽基礎データ整備

### 2.3 専門部会会合の開催

日時 平成 14 年 12 月 24 日 (火) 13:00～17:00

場所 富国生命ビル 28 階 中会議室  
東京都千代田区内幸町 2-2-2

議事

- 1) 専門部会の審議について
  - (1) 部会長挨拶
  - (2) 審議の進め方
- 2) 高崎研究所における放射線利用研究開発の概要  
(説明者：数土高崎研究所長)
- 3) 材料開発部の研究開発課題

(説明者：南波材料開発部長)

- 4) 環境・資源利用研究部の研究開発課題

(説明者：棚瀬イオンビーム生物応用研究部長)

- 5) 放射線高度利用センターの研究開発課題

(説明者：西堂放射線高度利用センター長)

- 6) 専門部会総括討議

(1) 評価結果について

(2) 今後の取りまとめについて

## 2.4 評価項目及び評価基準

今回の事後評価は、1次評価及び2次評価の2段階をとった。

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、これを示した。

2次評価においては、評価用資料（追加の補足説明資料があれば、これを含む）及び専門部会会合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た。

### 2.4.1 研究開発課題に対する評価項目及び評価基準

#### (1) 項目別評価

- 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ヶ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) その他の所見

上記の視点以外の特記すべき所感、問題点、提言等を示す。

#### 2.4.2 研究支援業務課題に対する評価項目及び評価基準

(1) 項目別評価

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つた原因・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) その他の所見

上記の視点以外の特記すべき所感、問題点、提言等を示す。

### 3. 評価対象研究開発課題の概要と評価結果

#### 3.1 高崎研究所における研究開発

##### 3.1.1 高崎研究所における放射線利用研究開発の概要

###### 3.1.1.1 放射線利用研究の位置付け

高崎研究所は、昭和 36 年に原子力委員会が策定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(原子力長計)に基づき、我が国の放射線化学研究の中核機関として昭和 38 年に設置された。それ以来、ガンマ線、電子線、イオンビームを用いた工業、農業、医療等への幅広い実用化技術を開発し、民間への積極的な技術移転を通して、国民生活の向上に貢献してきた。

平成 12 年策定の原子力長計では、国民生活に貢献する放射線利用として、植物の放射線育種、先端的な新素材及び新材料の創製、環境保全技術の開発が重要であり、産官学の連携の下、新産業の創出が重要と述べられている。高崎研究所は、これらを踏まえ、研究開発の実績と技術開発の蓄積を最大限活用し、産官学連携のもとに放射線利用の普及、新産業の創出を推進している。

###### 3.1.1.2 これまでの研究開発の経緯

高崎研究所の発足以来、ガンマ線照射施設、電子線照射施設及びイオンビーム研究施設(TIARA)を建設、運営し、機能材料、環境保全技術、バイオ技術等の開発を進めるとともに、原子炉用電線の健全性評価等に貢献してきた。

機能材料等の開発では、放射線化学反応を利用し耐熱性電線、ボタン型電池用隔膜、耐放射線性潤滑材、超耐熱性炭化ケイ素繊維等を実用化し、環境保全技術の開発では、石炭火力の排煙処理、ダイオキシン等の有害物質除去技術の開発や、食品照射や医療用具の滅・殺菌技術等を開発するとともに、バイオ技術では新種のカーネーションの創出技術等を開発してきた。特に、平成 5 年の TIARA の運転開始により、イオンビームを用いた宇宙用半導体素子・太陽電池、宇宙用高分子材料の劣化予測と性能改善、イオンビーム植物育種等で顕著な研究成果を挙げてきた。またこれらの研究開発を効率的に支援するため、ビーム照射技術の高度化、新技術開発を積極的に進めるとともに、大学、民間企業や、国外の研究者、技術者との共同研究の実施、研究員の受け入れなどを積極的に行ってている。また、原研支援ベンチャー制度による企業を 3 社設立した。

###### 3.1.1.3 当該期間中の主な成果

###### (1) 材料開発研究

###### 1) 機能材料創製の研究 (主要課題領域 1)

ガンマ線、電子線による橋かけ、分解、グラフト重合反応、或いはイオンビームを用いた不純物注入や穿孔等により、材料に新機能を付与する研究開発を行った。以下にその主な成果を示す。

- ・温度 30°C の上下で水の透過を ON-OFF できるイオン穿孔を用いた温度応答性フィルター

を開発した。

- ・治癒効果が早まり、無痛で剥がせ、透明な創傷被覆材を開発した。
- ・従来、放射線を照射すると分解するとされた多糖類を、ペースト状にして放射線を照射すると、分子同士が結合して強度や耐熱性が上昇する「橋かけ」反応が起こる新事実を発見した。
- ・海水中の有用金属を捕集する材料を、放射線グラフト重合法を用いて開発し、60日間海水中に浸漬して1kgのウランを回収した。

## 2) 放射線環境材料評価の研究（主要課題領域2）

半導体、太陽電池等の無機材料及びプラスチック等の有機材料の放射線による劣化機構を解明し、耐放射線性に優れた材料を開発するとともに耐放射線評価試験を行った。また新たな応用を目指して、陽電子ビーム技術を開発した。以下にその主な成果を示す。

- ・イオン注入と酸化膜形成技術を組み合わせて反転型電界効果トランジスタを試作し、世界最高レベルのチャネル移動度( $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )を達成した。
- ・各種の高エネルギー粒子から成る宇宙線をTIARAの高エネルギーイオンビームや電子線で模擬し、宇宙用半導体素子・太陽電池の寿命を予測した。
- ・高輝度陽電子ビーム技術を開発して、世界で初めて反射高速陽電子回折パターン及び一次ラウエ帯を観測し、従来では困難であった最表面構造の分析が陽電子ビームを用いること可能であることを実証した。
- ・電磁誘導防止用背筋として鉄筋に代わる高強度アラミド繊維樹脂複合材を開発し、さらに実用化した。

## (2) 環境・資源利用研究

### 1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発（主要課題領域1）

電子線による揮発性有機化合物分解機構の解明及びアルカリ物質添加等の分解の高効率化を研究した。またダイオキシンの放射線照射分解についても研究し、環境に役立つ放射線プロセスを開発した。以下に主要な成果を示す。

- ・電子線によるごみ燃焼排煙中のダイオキシン分解試験を自治体の協力で実施し、90%以上の分解率を実証した。
- ・電子ビーム照射によって、クロロエチレン類が塩素ラジカルを引き金として無害な物質まで連鎖反応により完全に分解できることを明らかにした。

### 2) 生物資源の利用技術に関する研究（主要課題領域2）

イオンビーム誘発突然変異の特異性を生かした有用な新遺伝子資源の創成、食糧資源の確保や環境保全に役立つ植物資源の創成及びマイクロビーム照射技術のバイオ分野への利用、放射線による遺伝子損傷とその修復機構を分子レベルで研究した。また生物の機能を生きたままで計測できるポジトロンイメージング技術を開発した。以下に主要な成果を示す。

- ・イオンビームにより、紫外線に感受性を有する突然変異体、フリル状の花を生ずる変異体などをシロイヌナズナで得た。またキクやカーネーションでは品種登録に繋がる実用

的な変異体を作出した。

- ・重イオンマイクロビームを用いて細胞核に正確にヒットさせる実験系を確立し、1個のヒットで、正常な細胞分裂が阻害されることを解明した。また放射線抵抗性細菌におけるDNA修復に関する遺伝子を新たに発見した。
- ・ポジトロン放出核種を用いた植物のイメージング法を世界に先駆けて確立し、塩ストレスに対して<sup>11</sup>C-標識メチオニンが生体（オオムギ）の防御に係わっている事実を解明した。またステントの<sup>133</sup>Xeイオン注入部位での再狭窄抑制効果など、医学分野への利用の可能性を示した。

### （3）施設運営とビーム利用技術開発

#### 1) 放射線照射施設の管理・運営（主要課題領域1）

イオン照射研究施設(TIARA)の管理・運営及びイオン加速器の安定かつ効率的な運転管理、並びに電子線・ガンマ線照射施設の円滑かつ効率的な運転管理を行うとともに、放射線利用研究拠点施設の機能を統括し、放射線利用研究を推進する業務を行った。以下に主な成果を示す。

- ・平成12年度にまとめたTIARA 10年間の施設利用の成果として、学術論文480件、国際会議報文254件、学位論文として修士55件及び博士15件、特許申請25件、新聞発表20件、学会等からの受賞8件が得られた。
- ・平成10年度から13年度までの4年間の電子線・ガンマ線照射施設利用に関して、学術論文(レフェリー付き)119件、学術論文(レフェリー無し)81件、特許申請39件が得られた。

#### 2) イオンビーム技術の開発（主要課題領域2）

ニーズを捉えたマイクロビーム技術開発並びにイオン源、加速器、線量計測等の技術開発を行った。また、イオンビーム利用の促進を図るためにビーム利用の技術開発と施設機能の高度化を行った。主な成果を以下に示す。

- ・サイクロトロンからの重イオンマイクロビームで大気中の細胞試料を自動照準シングルイオンヒットできる技術を開発した。
- ・マイクロPIXE分析技術では、大気中において1μmの空間分解能で元素の2次元分布測定が可能な技術(PIXEカメラ)を開発した。
- ・電子サイクロトロン共鳴(ECR)イオン源を開発し、HeからArまでのフルストリップイオンと鉄等の金属イオンの加速を実現するとともに、核子当たりの最大エネルギー27MeVを達成した。
- ・サイクロトロンのビーム変動の原因が鉄心温度上昇に伴う磁場変動であることを明らかにし、鉄心の定温化技術の開発によりビーム安定化に成功。
- ・国内ガンマ線量トレーサビリティシステムの整備を目的に、アラニン線量計の線量測定に関わる不確かさを評価し、「アラニン線量計測装置」の日本工業規格の制定に反映した。

### 3.1.1.4 研究開発の今後の展開

蓄積してきた照射利用技術、照射技術、計測技術を基に、実験及び理論の両面からイオンビーム、ガンマ線、電子線、RI を利用した機能材料、環境保全・環境浄化技術の開発、バイオ技術などの研究開発を重点的に推進するとともに、各種材料の耐放射線性評価の研究を行う。

特に、各放射線種の特徴を生かした材料のイオン照射効果の解明、イオン穿孔・ナノ描画等による微細構造制御等に関する基礎・基盤研究を進め、成果を社会的ニーズに応える実用技術に適用する。また、イオンビームが動植物の個体や細胞に与える効果を解明し、植物のイオンビーム育種、細胞加工に関する研究開発や植物ポジトロン・イメージング法を用いた生物機能解析を行う。

研究開発を効果的に支援するため、ニーズに的確に対応した先端的イオンビーム技術などの開発を進めるとともに TIARA を中心に開かれた照射施設の利用を推進する。また、安定かつ効率的な照射利用施設の運転管理を実現する。

さらに、産官学連携を効果的に進め、放射線利用の一層の普及、新産業の創出及び人材の育成を図り、我が国の放射線利用研究の中核的研究機関としての役割を的確に果たして行く。

### 3.1.2 所見

#### 3.1.2.1 放射線利用研究開発の主な成果について

原研高崎研究所は、国内のみならず、海外への援助を含めて、世界的にも放射線利用機関として、立派な役割を果たしている。環境資源利用研究部を廃止して、イオンビーム生物応用研究部としたのは、イオンビームを利用した生物資源研究により重点を置くことを狙ったものとして、高崎研究所のイオンビーム応用研究の特徴を鮮明にしたと評価できる。一方「環境」も重要なテーマであり、看板を降ろすことによって、その面での活力が低下しないよう配慮して欲しい。また、応用面で、ベンチャー設立は重要な成果と判断するが、ベンチャー設立で事足りりとしてその後のフォローアップ、支援が必ずしも充分でない印象を受ける。せっかく生まれた芽を更に育成し、発展させて頂きたい。

当該期間の研究は全体的に順調に推移し、材料開発研究、環境・資源利用研究、ともに多様な方向で顕著な研究成果をあげている。論文、特許などの数も多く、TIARA の運営、技術開発も効率よく行われている。なかでも、超耐熱性 SiC 繊維の開発、放射線グラフト重合による高性能吸着材料消臭剤の実用化、床ずれ予防マット開発などの材料分野での実用的成果の拡大に加え、生物応用分野での民間との共同研究による技術移転、実用化が進展し高く評価できる。特に、TIARA 10 年の研究開発を活用しての、世界 3 大花卉であるカーネーション、キクでの、世界に先駆けての実用品種育成と品種登録出願、カーネーションでの試験販売開始までに至ったのは大きな成果である。また、当初計画にない付帶的な結果も数多く得ており、それらから大きな知見を得ている。これらの知見を今後の展開の中に十分活かすことが重要であろう。

#### 3.1.2.2 特定事項について

##### 1) 環境保全の研究

21 世紀の社会的ニーズである、環境保全植物・環境浄化植物資源の創生や環境ストレス耐性植物資源の創生にも拍車がかかると期待される。生分解性プラスチック開発、環境応答性多孔膜、有害金属捕集など、材料分野でも生態系保全技術開発が進んでいる。「環境との調和、生態系になじんだ技術」をキーワードに、材料とバイオとがリンクしている開発を開拓・実現させることが重要と考える。この施設でなくてはできないユニークな活動を中心に進めていただきたい。

##### 2) 応用研究

応用性を重視する場合には、ただ応用したということが大切なのではなく、それが社会的に十分浸透できて初めて応用したといえるであろう。つまり、高い開発費をかけてニッチを追求するのではなく、もっと大きく使えるものを開発して欲しい。

バイオへの応用は観賞用植物の品種改良などは良いと思うが、食品への利用に関しては社会的認知が得られない可能性も高いと思われる所以、安全性評価なども慎重に進めていただきたい。

環境応用（排ガス処理）は実用段階ではあるが、本質的でない問題点等で進展が遅れる

可能性もあり、是非最後の段階まで技術面で支援をお願いしたい。

### 3) 外部との協力

日本だけでなく、国際的なセンターとして充分に機能できるよう、グローバルな視点からも更なるレベルアップを期待したい。

### 4) 新産業創出

「材料、環境、バイオ」での新産業創出の分野として、「生物応用」でのカイコ利用あるいは植物資源・DNA利用面からの医薬品開発・製造技術の開発、「材料創製」でのハイドロゲル利用、また環境応答膜利用による医療福祉製品開発など、今後の生活の質の向上に貢献する、医療・福祉分野での寄与が期待される(放医研とは異なるカテゴリーでの寄与)。

### 5) 加速器技術開発

放射線利用を進めるために、簡便なビーム発生器の開発も必要かと思われる。加速器等もかなり老朽化しつつあるので次期加速器設置計画をこれまでの経験を生かして推進して欲しい。

### 3.2 材料開発部の研究開発

#### 3.2.1 研究開発課題の概要

電子線、ガンマ線、イオンビームなどの放射線の特長を活かし、放射線の照射効果に関する基礎的研究を行なうとともに、得られた成果を基に、社会的ニーズに対応する材料創製や放射線場で使用する材料の信頼性評価などの実用的技術の研究開発を進めた。

##### 3.2.1.1 主要課題領域の構成、研究開発目標及び成果

###### [主要課題領域の構成及び目標]

###### (1) 機能材料創製の研究（主要課題領域 1）

###### 1) 有機機能材料創製に関する研究（高機能材料第 1 研究室）

原子・分子レベルで構造制御された有機高分子材料の設計とその合成技術を確立し、イオンビームを利用して新規の有機機能性高分子材料を創製する。

###### 2) 放射線加工処理に関する技術開発（照射利用開発室、高機能材料第 1 研究室）

生分解性高分子材料の耐熱性を改善することを目的に、放射線を用いた橋かけ技術の開発を行い、橋かけと生分解性との関係を明らかにする。天然高分子材料の研究では、橋かけ構造導入の技術開発を行い、放射線分解による低分子化物の生物活性機能を明確にし、農業分野への応用を目指す。

###### 3) 分離機能材料の開発研究（照射利用開発室）

海水中の有用金属捕集のため、放射線グラフト重合を用いた高性能捕集材を開発する。この捕集材の実海域での適応性評価を目的として、自然海流と波力を利用した捕集システムの工学的試験を実施し、精度の高いコスト試算のためのデータを蓄積し、本システムの実用化の可能性を検討する。

###### 4) 放射線照射利用に関する技術協力（業務課題）（照射利用開発室、高機能材料第 1 研究室）

二国間研究協力、RCA/IAEA 協力、アジア原子力フォーラム(FNCA)などの国際研究協力システムの下に、東南アジア諸国等に対する技術協力を進める。

###### 5) 無機機能材料創製に関する研究（高機能材料第 2 研究室）

イオンビーム等を用いて、原子配列や電子状態を調整した表面構造構築や多層膜の合成条件探索及びそれに必要な構造評価技術の開発を行い、表面を介した光エネルギーの変換・伝播に関わる新機能を有する無機機能材料を創製する。

###### (2) 放射線環境材料評価の研究（主要課題領域 2）

###### 1) 半導体材料・素子の耐放射線性に関する研究（技術開発課）

炭化ケイ素 (SiC) 半導体素子作製の要素技術を開発する。これを用いて集積回路 (IC) を構成する基本素子を試作し、SiC の耐放射線性を素子レベルで実証する。また、宇宙用半導体素子や太陽電池の耐放射線性評価技術を確立する。さらに、半導体素子や太陽電池の照射劣化機構の解明を行う。

###### 2) 陽電子ビーム利用技術の開発（技術開発課）

陽電子ビームを用いた同時計数ドップラー拡がり測定及び寿命測定などの技術開発と

材料表面層に形成される放射線損傷領域の原子空孔型欠陥の分離評価手法の確立を目指す。また、反射高速陽電子回折（RHEPD）技術を開発し、陽電子の全反射現象を実証する。陽電子ビーム技術を利用して、材料の放射線劣化機構、機能発現機構及び最表面物性を解明する。

### 3) 有機極限材料の研究（極限材料研究室）

放射線環境下で使用する有機系材料の評価と開発を目的として、高分子材料、繊維強化樹脂、セラミック繊維、セラミック複合材の耐放射線性評価及び放射線を利用した材料開発を行う。また高温、極低温、高真空間環境での放射線照射による耐久性評価、劣化機構の解明により、耐放射線性、高強度、耐熱性、低放射化材料を開発する。

### 4) 原子炉用電線の経年変化に関する研究（極限材料研究室）

原子炉の安全性を確保し長寿命化を図るために、原子炉用電線ケーブル（高分子絶縁体等）の寿命評価法、及び非破壊劣化診断技術を確立する。

## [主要課題領域の成果]

(1) 機能材料創製の研究（主要課題領域1）
1) 有機機能材料創製に関する研究（高機能材料第1研究室）
当初の達成目標
<ul style="list-style-type: none"> <li>・高分子材料にイオン照射を行い、多孔化したイオン穿孔膜を作製する。</li> <li>・環境の変化に応じて状態を変化させるインテリジェント材料、ならびに特定の物質を識別・分離できる選択分離材料の合成を行う。</li> <li>・イオン穿孔膜に環境応答性や物質識別性を有する機能材料を化学的に結合させ、環境応答性ならびに選択分離性を持つ多孔膜を開発する。</li> <li>・温度応答性多孔膜を作製し、温度変化に追従した孔径の変化を直接観測する技術開発と分子量の異なる物質の分離効率の研究を進める。</li> </ul>
研究成果の内容
<ul style="list-style-type: none"> <li>・重イオンを照射した PET フィルムをアルカリ水溶液でエッチング処理し、孔の貫通及び孔径を電気伝導度測定ならびに光学顕微鏡でモニターし、直径 0.02~3 μm の範囲で均一な円筒状の孔を作る技術を確立した(H12)。</li> <li>・イオン穿孔膜の孔壁面に NIPAAm を γ 線グラフト重合で層状に結合させ、温度 30°C 前後で水の透過を ON-OFF 制御できるスイッチング機能を持った新フィルターの開発に成功した(H9)。</li> <li>・イオンビーム照射技術で得られた微細孔をナノスケールで制御し、血液中の特定のタンパク質の分離が可能な分離膜の作成に成功した(H13)。</li> <li>・酸性度に応答する化合物を用いて、金属イオン（セシウム、リチウム）を選択的に分離することが可能なイオン穿孔膜を開発した(H13)。</li> </ul> <p>(当初の達成目標以外の成果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・宇宙線検出用のプラスチック素材「ハーツラス」に、温度応答性を持つ NIPAAm を共重合することによって、27MeV のプロトンまで検出でき、検出感度を約 10 倍に高めたイオン検出用プラスチック材料を開発し、実用化。(H10)</li> <li>・孔径 250nm の PET 製イオン穿孔膜の微細孔中に、電気メッキ法により円柱状の金属細線を形成させることで、ナノ電子デバイスへ応用可能なハイブリッド膜の作製技術を確立した。(H13)。</li> <li>・酸発生剤であるスルホニウム塩の電子ビーム励起反応で、これまでより 6 倍以上の酸発生効率を示す新規スルホニウム塩の生成が確認できた(H13)。</li> </ul>

## 2) 放射線加工処理に関する技術開発（照射利用開発室、高機能材料第1研究室）

### 当初の達成目標

- ・ポリビニールアルコール（PVA）ハイドロゲルを開発し、その応用を図る。
- ・PVAハイドロゲルの橋かけを行い、水蒸気殺菌に耐える耐熱性を実現する。
- ・生分解性PCLの耐熱性向上、成形加工性の改質を行う。

### 研究成果の内容

- ・PVAハイドロゲルを医療材料に用いるため、アセタール化と照射との併用により、煮沸やオートクレーブ滅菌温度までの耐熱性を付与し(H10)、創傷被覆材として実用化する見通しを得た(H13)。
- ・生分解性ポリマーPHB02の加工性を照射による溶融粘度の向上によって改善することにより、実規模装置でのプロー成形速度が15倍に向上するとともに、発泡体の成形が可能となった(H11)。
- ・TAICは、1%の低濃度でも、全脂肪族ポリエステルの橋かけに有効に働く添加剤であることを見出し、150°Cでも融解しない生分解性高分子材料を開発した(H12)。土壤埋設試験の結果、橋かけ試料の分解は、未照射試料と同様に微生物分解により進行することがわかった(H13)。

#### (当初の達成目標以外の成果)

- ・従来、放射線分解型とされてきた多糖類にエーテル型誘導体を添加し、高濃度のペースト状照射を行うと橋かけ反応が起こる新事実を発見した。橋かけCMSは、1gで600gの水を吸収する高吸水ゲルとなった(H13)。

## 3) 分離機能材料の開発研究（照射利用開発室）

### 当初の達成目標

- ・海水中から有用金属を採取する捕集材の性能向上を目的として、不織布基材の選定、放射線グラフト重合におけるモノマー組成比及びアミドキシム基変換反応の研究を進め、高性能捕集材最適合成条件を明らかにする。
- ・実海域に海洋構築物を係留し、海中有用金属捕集試験を行い、海象条件・海洋生物の影響、実用規模への安全性評価、スケールアップ効果評価を実施。
- ・実海域試験装置を用いて捕集した捕集材中の海中有用金属（U, V, Ti, Co等）の分離・回収のため、陸上に設置した溶離試験装置を用いて、酸性溶液による分別溶離技術、溶離液中の有用金属の分離精製技術を確立する。平成11年度から3年間の試験で、1kgの海水ウランを回収することを目標とする。
- ・放射線グラフト重合法を応用した有用金属捕集材の大量合成技術を確立し、委託企業に技術移転を進める。

### 研究成果の内容

- ・高性能捕集材の合成法の研究では、捕集材纖維の表面積の増大に伴って捕集性能が直線的に増大することを明らかにした。最適条件で合成した捕集材は、20日間の海水浸漬で1.7g/kg-adのウラン捕集性能を示した(H10)。
- ・実海域試験において、海洋生物の試験装置や捕集材への付着は、可視光の到達深度に大きく影響されることが分かった(H13)。
- ・実用規模でのコスト試算及び経済性評価を行った結果、海水ウランのコストは鉱山ウランの場合の8~10倍となることが分かった。捕集システムがコストの80%を占めるため、捕集材を保持する金属籠の重量の軽減と捕集材の性能向上で従来技術と競合できる可能性があり、そのためのモール状捕集材の合成方法を開発した(H13)。
- ・捕集した有用金属（U, V）を含む捕集材から、溶離試験装置を用いて、0.5Mの塩酸で主にウランを溶離し、Vは捕集材中に残すという分別溶離が可能になった(H13)。
- ・キレート樹脂充填筒に溶離液を流して固定化したウランを精錬工場に委託し、精製試験を行った。3年間の実海域試験で1kgのウラン（イエローケーキ換算）を捕集することに成功した(H13)。
- ・新たに連続含浸グラフト重合法を開発して、約3800m<sup>2</sup>（当初目標：約3000m<sup>2</sup>）の捕集材を合成し、実海域試験用捕集材の大量生産技術を確立した(H12)。

#### 4) 放射線照射利用に関する技術協力（照射利用開発室、高機能材料第1研究室）

##### 業務の目標

###### a) 二国間研究協力

- ・インドネシア、マレーシア、タイ、中国、ベトナムの5カ国との協力をを行う。研究者の相互派遣や情報交換により、アジア諸国における放射線加工処理技術の確立を図る。

###### b) RCA/IAEA 協力

- ・RCA の工業利用分野のリードカントリーとして放射線加工処理分野の研究協力を主導し、アジアにおける指導的、中心的研究センターとして、地域訓練コース及び各国調整者会合の開催、研修生受入れ及び専門家派遣を実施する。

##### 業務成果の内容

###### a) 二国間研究協力

- ・インドネシア原子力庁 (BATAN) との研究協力では、放射線加硫技術により、アレルギーのおそれのが少ない天然ゴムラテックス製造法の開発に成功した。研究協力で多くの研究成果が得られ、人材育成に貢献。電子加速器も導入し、BATAN は東南アジア屈指の放射線応用センターに成長した(H9~12)。
- ・マレーシア原子力研究所 (MINT) との研究協力では、オイルパーム廃棄物の飼料化に関する放射線殺菌・発酵処理プロセスを確立した。デンプンの放射線橋かけでは、放射線橋かけポリビニルアルコールハイドロゲルは、デンプンとブレンドすることにより、ゲル強度と表面粘着性が向上し、創傷被覆材への応用可能性を明らかにした。研究員レベルは向上し、UNDP/RCA/IAEA プロジェクトで指導的立場をとれるようになった。(H9~13)。
- ・タイ原子力庁 (OAE) との研究協力では、糖蜜のアルコール発酵で大量排出される黒褐色廃液の有効処理法の検討を行い、黒コウジ菌が脱色及びBOD 低減について高活性を有することを明らかにした。絹タンパク質の放射線加工に関する研究では、放射線分解した絹は粉碎が容易になり、微粉末試料の調製や可溶化が可能となった(H9~13)。
- ・中国核工業総公司 (CNNC) との研究協力では、放射線による環境保全技術と高分子材料の放射線加工の情報交換と人材交流を行った。石炭火力発電所の電子線排煙処理プラントの概念設計及び揮発性有機化合物の電子線によるエアロゾル化に関する研究を実施し、中国の環境保全研究の推進に役立った。受入れ研究員が天然ゴムラテックスの放射線加硫における線量率効果や各種高分子材料の放射線照射効果を明らかにした(H9~12)。
- ・ベトナム原子力委員会 (VAEC) との研究協力では、海洋多糖類の放射線加工に関して、1)褐藻類多糖類アルギン酸ソーダの放射線分解処理産物は、イネ、キャベツ、人参などの作物の生長促進に有効である、2)甲殻類の殻などから得られる多糖類キトサンの放射線処理により、植物の重金属傷害を効果的に抑制できる、3)照射キトサンの抗菌活性の増大効果を利用して、マンゴーなどの果実の貯蔵期間を延長できる、などを明らかにした(H12~13)。

###### b) RCA/IAEA 協力

- ・天然ゴムラテックスの放射線加硫 (RVNRL) に関する協力研究計画 (CRP) を2年間実施し、マレーシア、タイ、インドで RVNRL 製造技術が実用化された。
- ・天然高分子の放射線加工に関する CRP を2年間実施した。多糖類を用いて、医療用、農業利用、環境保全への応用を目指した研究を進めた。平成12年からは、RCA プロジェクトとして天然高分子の放射線加工処理が開始され、日本がリードカントリーとしてプロジェクトを主導した(H9~13)。

##### (当初予定外の業務)

###### c) FNCA 協力

- ・原子力委員会の下で行われているアジア原子力協力フォーラム (FNCA) の中の農業利用プロジェクトの事務局として、植物の突然変異育種ワークショップの運営を担当した(H12~13)。

###### d) 放射線利用の経済規模調査

- 平成9年度時点での日米の放射線利用の経済規模調査を行った。日本の放射線利用の経済規模は、約8兆6千億円と日本のエネルギー利用をしのぐレベルであることを明らかにした(H11～12)。

## 5) 無機機能材料創製に関する研究 (高機能材料第2研究室)

### 当初の達成目標

- a) 可視光応答性光触媒材料の創製のための電子構造の制御に関する研究

$TiO_2$ 内に可視光の吸収で生じた電子・正孔が再結合せずに、酸化・還元反応に寄与させるために、バンドギャップ制御技術を確立する。

- b) 可視光の伝播制御に関する研究

金属・絶縁体相転移物質を創製し、相転移する温度領域を常圧で室温近傍に下降させる。そのため、サファイア上に同物質をエピタキシャル成長させる技術を確立する。

- c) 軟X線の伝播制御に関する研究

軟X線の伝播制御を行うため、分子ビーム蒸着法によりサファイアの3つの主な結晶面上に金属薄膜を積層する。物質系としては重元素と軽元素との組み合わせを考え、イオンビーム解析により重元素と軽元素の同時分析を行う。

### 研究成果の内容

- a) 可視光応答性光触媒材料の創製のための電子構造の制御に関する研究

- レーザー蒸着法による  $TiO_2$  薄膜成長技術を開発し、各種単結晶基板上ヘルチル或いはアナターゼ相  $TiO_2$  薄膜をエピタキシャル成長させた(H12)。
- $TiO_2$ へのCr添加が可視光応答性付与に有効なことを見出した(H12)。特に表面に向かってCr濃度が増加する分布を実現して、高い電荷分離性能を持たせる事に成功し、新開発したパルス光励起表面正孔量測定システムによりこの高い電荷分離を確認した(H13)。
- 第一原理に基き  $TiO_2$ への遷移金属注入時の状態密度を計算し、バンドギャップ中への不純物準位形成による可視光応答特性付与を確認した。さらに、アニオニイオン注入によるバンドギャップ幅の減少を予測した(H13)。

- b) 可視光の伝播制御に関する研究

- 温度による光フィルター材料としての  $VO_2$  薄膜合成では、レーザー蒸着法により、サファイア基板上にエピタキシャル成長させることにより、結晶性に優れ、68°C付近での金属・半導体相転移により3桁半から4桁の電気伝導度の変化をおこすフィルター材の合成に成功した(H10)。
- $VO_2$  薄膜の特性改善と相転移温度制御の研究では、面方位の異なるサファイア基板上に成長した  $VO_2$  薄膜の相転移温度が異なり、またサファイア、Si及びガラス基板上に成長した  $VO_2$  薄膜のヒステリシス温度幅が異なることを見出した(H11)。さらに、イオン照射及びMo等の不純物添加により相転移温度制御に成功した(H11)。

- c) 軟X線の伝播制御に関する研究

- X線反射素子材料としての多層膜の合成では、分子ビーム蒸着法を用いてサファイア基板上にNb単結晶薄膜を形成させ、その上にFCC金属結晶膜を形成して各種金属単結晶薄膜を形成する技術を確立した(H11)。
- 化学的・熱的に安定な軟X線多層膜ミラーの構造材料として、Ti-Cu系及びTi-Ni系という光学定数の大きく異なる組合せについて、結晶性多層膜成長技術の開発を進め、Ti-Cu系についてはサファイア基板上でCuとTiを交互にエピタキシャル成長させることによって、3層構造(Ti/Cu/Ti)の作製に成功した。Ti-Ni系ではTi膜上にバッファ層として数原子層のNb膜を蒸着した上でNiを蒸着させ、Ni膜の結晶性を向上させた(H11)。
- イオンビーム解析で結晶性多層膜構造を分析し、重元素金属、軽元素金属とともに基板の結晶性を保ったままのエピタキシャル成長を実験的に確認した(H12)。

#### (当初の達成目標以外の成果)

- 銅多結晶基板への炭素イオン注入その場観察の結果、玉葱状炭素集合体(カーボンオニオン、以下オニオンとする)の核形成観察に成功し、転位近傍でのオニオンの優先的核形成を初めて見出

した。また一部は銅を内包するカプセル構造になっていることを見出した(H11)。

- ・イオン照射下でのオニオンの効率的生成条件の探索をイオン注入その場電子顕微鏡観察で行い、注入炭素量の約80%がオニオン形成に寄与することを解明した。また核形成・成長過程の速度論的解析から、オニオンの核形成時間のばらつきが、表面から抜けていく炭素濃度の差によることを示した(H12)。

## (2) 放射線環境材料評価の研究（主要課題領域2）

### 1) 半導体材料・素子の耐放射線性に関する研究（技術開発課）

#### 当初の達成目標

##### a) 耐放射線性SiC半導体素子の開発

- ・高品質大面積SiC単結晶製作の基盤技術を構築する。
- ・イオン注入法を用いた半導体の電気伝導度制御技術を開発するとともに、酸化膜形成技術を進展させ、酸化膜への耐放射線性付与技術を開発する。
- ・これらを組み合わせて、電界効果トランジスタ(FET)、ダイオードを試作し、その耐放射線耐性を検証する。

##### b) 宇宙用半導体の耐放射線性評価

- ・太陽電池への陽子線・電子線照射技術を開発し、照射劣化挙動を解明する。
- ・集積回路に対しての高エネルギーイオン照射試験手法を開発し、シングルイベント(SE)耐性の評価を行う。
- ・重イオンマイクロビームを用いてSE発生機構を解明する。
- ・低線量率でガンマ線照射を行い、素子の劣化挙動を明確にする。

#### 研究成果の内容

##### a) 耐放射線性SiC半導体素子の開発

- ・SiC単結晶薄膜作製装置を用い、3インチSi基板全面に原子レベルで平滑な表面を有する厚さ30μmの単結晶成長に成功した(H11)。
- ・SiC半導体の放射線劣化要因となる照射欠陥の分析を進め、Si空孔やC空孔等の欠陥の基本構造(H9)と電子状態、アニール挙動、並びに電気・光学特性に及ぼす影響を解明した(H12, 13)。
- ・高温注入や炭素イオン共注入技術を開発し、世界に先駆けpn両型の制御技術を確立した(H12, 13)。
- ・イオン注入と酸化膜形成技術を組み合わせて反転型n及びpチャネル電界効果トランジスタを試作し、世界最高レベルのチャネル移動度を達成(H11)。
- ・重イオンマイクロビーム照射によりSiCダイオード中に発生する過渡電流測定に成功し(H13)、SE評価の基礎データを得た。SiC FETのトータルドーズ耐性は、従来のSiトランジスタより2桁以上高いことを実証(H12)。

##### b) 宇宙用半導体の耐放射線性評価

- ・模擬太陽光中での太陽電池への陽子線・電子線照射技術を開発した(H9)。
- ・Si, GaAs太陽電池特性の放射線照射効果及び劣化機構を解明し、人工衛星COMETの運用期間策定に貢献した(H11)。また耐放射線性を付与した新構造Si太陽電池の設計に貢献した(H12)。
- ・地上用新構造・新材料太陽電池の放射線照射効果を調べ、ミッション実証衛星(MDS-1)搭載用太陽電池を選択した(H9)。また次期宇宙用太陽電池として多接合型太陽電池が有力であり、カルコパイライト半導体(CuInSe<sub>2</sub>)薄膜太陽電池が高耐放射線性をもつことを示した(H10)。
- ・高エネルギーイオン照射によるバイポーラ素子の破壊機構を解明した(H11)。
- ・民生半導体部品の評価技術の確立とデータ蓄積を行い、民生技術の宇宙転用への可能性を明らかにした(H9~13)。
- ・シングルイオンヒットシステムを応用し、SE発生の原因となるイオン入射により半導体素子中に発生する過渡電流測定系を構築した(H11~13)。
- ・Silicon on Insulator構造素子の優れた耐放射線性とその機構を示した(H12)。
- ・ガンマ線の低線量率照射効果研究の必要性を明らかにし、その照射技術の開発及び民生部品に対

するデータ蓄積を行った(H9~13)。

## 2) 陽電子ビーム利用技術の開発 (技術開発課)

### 当初の達成目標

#### a) 陽電子ビーム技術の開発

- ・数  $\mu\text{m}$  の物質表層中に形成される格子欠陥の深さ分布測定が可能なエネルギー可変低速陽電子ビームを開発する。
- ・原子空孔型欠陥の空隙寸法を陽電子寿命に基づき定量評価するため、短パルス陽電子ビーム形成技術を確立する。
- ・同時計数ドップラー拡がり測定や寿命測定技術を整備する。
- ・物質最表面の新規解析法である反射高速陽電子回折技術 (RHEPD) を開発し、理論予測されている陽電子の全反射現象を実証する。

#### b) 陽電子ビーム利用研究

- ・陽電子ビーム計測技術と電気測定法等を複合し、SiC 半導体中の照射誘起欠陥の熱的安定性やその電気特性との関連を解明し、材料劣化に及ぼす影響や照射後熱処理条件を決定する。
- ・SiC 製 FET の性能を決定する  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  界面の構造欠陥を検出し、界面品質向上の指針を得る。
- ・希土類元素注入  $\text{SiO}_2$  及び光触媒材料  $\text{TiO}_2$  のイオン誘起構造変化と光学機能発現機構を探る。
- ・Si や SiC 半導体表面の水素不動態化処理に伴う表面原子構造を解析し、表面処理条件を導出する。

### 研究成果の内容

#### a) 陽電子ビーム技術の開発

- ・0.2keV~30keV エネルギー可変の低速陽電子ビーム発生装置を開発した。小径ビームを実現した。同時計数ドップラー拡がり測定装置を整備し、陽電子消滅位置の化学状態の分析を可能にした(H13)。
- ・多段バンチング方式の採用で、利用効率及び S/N 比の点で、より高品質の短パルス陽電子ビームを得た(H13)。
- ・静電レンズ集束した陽電子ビームのエネルギー選別とピンホールコリメータの考案により、直 径 1mm 以下、角度分散  $0.1^\circ$  以下、エネルギー分散 1%以下の高輝度陽電子ビームを実現した (H13)。世界初の RHEPD パターンの観測に成功した(H10)。陽電子の全反射効果を実証した。さらに、表面原子の運動状態を反映する一次ラウエ帯の観測にも初めて成功した(H13)。

#### b) 陽電子ビーム利用研究

- ・電子線及び He 照射した 3C SiC 半導体では、Si 空孔が主な陽電子捕獲中心であり、 $1000^\circ\text{C}$ 以下の熱処理で消失することを解明した(H12)。六方晶 SiC では Si 空孔が  $1000^\circ\text{C}$ 以上でも残留し、キャリヤーの補償中心として作用する正体不明の E1/2 及び Z1/2 電子準位と関係していることを示した(H12)。また、消滅ガンマ線の二次元角度相関測定 (当初予定外) から、六方晶中の Si 原子空孔の結晶学的特長を決定した(H13)。
- ・SiC の MOS デバイス構造を作製し、 $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  界面に陽電子を捕集する電圧を印加し、構造欠陥を検出した結果、陽電子消滅パラメータの電圧特性が接合容量測定と良く一致することを見出し、また界面でのマイクロボイドの存在を明らかにした(H13)。
- ・希土類イオンを注入した  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  中の注入欠陥を陽電子ビームと ESR で検出し、その熱処理に伴う消失過程を決定した。また、カソードルミネッセンス測定から、Er 注入に伴う赤外発光、Eu, Tb 及び Ce による赤、緑、青の可視発光を見出した。光学遷移を引き起こすには損傷除去だけでなく、希土類イオン自体を光学的に活性な状態にする必要があることを解明した(H11)。
- ・フッ素イオン注入した  $\text{TiO}_2$  の可視光応答性が、 $1200^\circ\text{C}$ のアニールにより注入損傷が除去されると同時に発現することを示した(H13)。
- ・RHEPT の全反射強度分布が、最表面構造に敏感に反応することを示し、また全反射強度解析法を確立した(H11)。水素終端シリコン表面の構造解析を行い、 $(-\text{SiH}_3)$  の ( $\equiv\text{SiH}$ ) 表面付着の事実

を得、また SiC を高温水素ガスアニール法で原子的に平坦な表面を形成する最適処理条件を導いた(H12)。

### 3) 有機極限材料の研究（極限材料研究室）

#### 当初の達成目標

##### a) 耐放射線性有機材料の研究

- ・高分子材料及び纖維強化樹脂の耐放射線評価を行う。各種の放射線（イオン、電子、 $\gamma$ 線）を照射し、線質依存性を見出して新たな放射線利用を開拓する。
- ・イオン照射効果については、線質依存性を力学特性の変化、架橋反応/切断反応の割合、分解ガス生成量の分析から検討し、その特徴を抽出する。
- ・極低温 $\gamma$ 線照射効果試験については、力学特性の変化、分子量変化等から温度依存性の機構を解明し、核融合炉用超電導磁石に適用できる絶縁材料の候補材料とその耐放射線性を試験する。
- ・高温下放射線照射効果については、各種高分子に低酸素濃度雰囲気で $\gamma$ 線及び電子線照射を行い、高分子反応の挙動を解明する。

##### b) 原子力耐環境性材料の開発

- ・SiC 纖維を強化纖維にしたセラミック複合材料を、放射線照射を利用して製造する技術開発を行う。また SiC 纖維の高強度化研究を行う。
- ・耐熱性纖維強化樹脂の開発では、PTFE の放射線架橋技術の実用化研究、纖維強化 PTFE 複合材料及び纖維強化ポリイミド複合材の放射線架橋研究を行い、300°C 程度の放射線環境に耐える有機系複合材料を開発する。
- c) 核融合炉機器部品の耐放射線性研究
- ・核融合炉用遠隔操作機器部品を主体に絶縁材料、センサーなどの耐放射線性評価と新規材料の開発を行う。
- ・室温空気中及び 250°C 窒素ガス中で 100MGy までの $\gamma$ 線照射を行い、電気特性、力学特性、形状変化などを測定して耐熱・耐放射線性データを蓄積する。
- ・平成 10 年度以降は、実用に即した機器部品の耐熱・耐放射線性を評価する。

#### 研究成果の内容

##### a) 耐放射線性有機材料の研究

- ・イオン照射を含めて照射温度依存性が重要であり、またイオン照射による高分子材料及び複合材料の力学的特性の変化は、同線量の場合には電子線及び $\gamma$ 線照射とほぼ同等であることが分かった(H11)。
- ・核融合炉用超電導磁石有機複合材では新組成の耐放射線性絶縁材を開発した。耐放射線性有機複合材料の開発では、コンクリート中の鉄筋に代わるアラミド纖維強化樹脂複合材料を開発した(H9)。

##### b) 原子力耐環境性材料の開発

- ・放射線を用いて力学特性を測定できる大きさの SiC/SiC セラミック複合材を作製し、破壊試験の結果、構造材に求められる非脆性破壊特性を示した(H12)。
- ・混合ケイ素系ポリマーを用いて平均径  $6 \mu\text{m}$  の極細 SiC 纖維の連続紡糸に成功した (H12, 当初予定期外)。
- ・PTFE の放射線架橋の研究を進展させ、科学技術振興事業団の開発課題に採択された(H9)。放射線架橋によって PTFE の耐放射線性が数百倍に上がり、耐摩耗性も 3 衍上昇することが判明した (H9)。

##### c) 核融合炉機器部品の耐放射線性研究

- ・核融合炉用遠隔操作機器に用いる高分子材料、センサー、電気機器部品は、予測を上回る耐熱・耐放射線性を示すことがわかった(H9)。
- ・要素技術の開発では、250°C の高温で 100MGy の放射線に耐える高分子を選択し、電線や電気部品に応用した。一環として従来品の約 50 倍である 100MGy に耐える三相誘導モーターを開発した

(H11)。

#### 4) 原子炉用電線の経年変化に関する研究

##### 当初の達成目標

- ・放射線と熱の複合環境下で40年間使用される原子炉用電線・ケーブルの寿命予測法と非破壊劣化診断技術の開発を行い寿命評価システムを確立する。
- ・寿命予測技術では、電線ケーブルの放射線と熱の複合劣化における寿命を予め短時間（1000時間程度）に予測する方法を開発する。
- ・劣化診断技術では、電線・ケーブルの高分子材料の新たな非破壊劣化検出技術を開発する。

##### 研究成果の内容

- ・電気学会電気規格調査会の標準規格(JEC-6152-1996)にも採用されている $\gamma$ 線照射と熱劣化を組み合わせた劣化加速試験を行い、原子炉環境で40年相当の劣化を推定する方法を開発した(H10)。
- ・微小量の捻り歪みを与え、そのときの応力を測定することによって非破壊的に劣化を評価する「応力-歪応答法」を開発した。歪みトルク応答試験機を開発し、本方法の有効性を実証した(H10)。

#### 3.2.1.2 研究資源の実績

	予算(百万円)						人員(人・年)
	研究費	運転 維持費	研究設備費 (建設費等)	その他 (委託費等)	特別会計等	合計	
(1) 機能材料創製の研究(主要課題領域1)							
小計	295+617	239	0	209	65	1,425	92 + 0
(2) 放射線環境材料評価の研究(主要課題領域2)							
小計	298+196	225	0	0	0	719	105 + 4
総合計	593+813	464	0	209	65	2,145	197 + 4

注：研究費の十は、補正予算を示す。

#### 3.2.1.3 人材育成

平成13年4月から群馬大学と高崎研究所との間で連携大学院大学が発足し、材料開発部からは、教授4名、助教授1名がその任にあたった。また、博士研究員、特別研究生の受入を積極的に行い、5年間の博士研究員、特別研究生は、それぞれ、17人・年、40人・年であった。この他、学生実習生や外来研究員を受け入れ、原研独自の技術の習得と先端技術の研究への積極的な参画を図った。アジア各国への研究協力では、原研における研究開発の成果に基づき、多くの研究者が学位を取得するなど、専門家の育成にも貢献した。この結果、各国に放射線加工処理分野の研究拠点が広がった。

#### 3.2.1.4 所内外との研究協力

材料開発部での5年間の共同研究、受託研究、委託研究、協力研究(大学)の件数は、各々73、14、10、116件であった。特に大学との協力件数が多く、基礎研究的な分野で新規の知見を得ることができた。また実用的な分野では、企業や公的研究機関との共同研究も多く、例えば、宇宙開発事業団との宇宙用半導体の耐放射線性評価及び宇宙用有機複合材料の耐放射線性に関する共同研究や電力中央研究所との海水からのウラン捕集についての共同研究等があり、宇宙開発や資源確保という大きな課題の達成に貢献した。原研所内

では、むつ事業所と連携して実海域試験を行い、グラフト重合で作製した捕集材の評価等を推進した。ドイツ重イオン研究所(GSI)との共同研究では、温度応答性多孔膜の口径制御技術の開発に結実した。

### 3.2.1.5 科学技術分野の進展への寄与、成果の波及効果

#### [科学技術分野の進展への寄与]

- ・高分子材料膜にイオンビーム照射することにより、ミクロンやナノサイズの穿孔作製が可能であることを示した。
- ・放射線分解型とされてきた多糖類が、高濃度のペースト状にして放射線照射すると「橋かけ」反応を起こすという新事実を発見した。
- ・陽電子ビーム利用技術の開発は、未知電子準位の同定や格子欠陥の特性解明に繋がった。RHEPD 開発は、陽電子の全反射回折現象を実証し、また表面研究者に新分析手法を提供了。
- ・高分子への放射線照射における線質効果について、マクロ的特性ではイオン照射と $\gamma$ 線、電子線照射で差が見られないことを示した。一方、高分子への放射線効果では温度依存性が重要であることを解明した。
- ・「応力一歪応答法」を開発し、電線・ケーブルの絶縁材である有機高分子材料の短時間での寿命予測法を達成した。

#### [成果の波及効果]

- ・開発された固体核飛跡検出器用樹脂は、市販され、宇宙開発事業団において宇宙線検出用として使用されるなど、高い評価を得ている。
- ・ハイドロゲル創傷被覆材に関しては、科学技術振興事業団の斡旋により、ニチバン（株）が平成8年4月から製造技術の委託開発を進め、平成9年12月に連続照射装を設置し、製造試験を開始した。臨床試験は平成13年9月30日に完了し、厚生省の認可を得て製品化の予定である。
- ・SiC 中の欠陥研究の成果は、半導体研究分野にとっても重要であり、素子作製技術の研究に役立っている。耐放射線性素子作製の技術は、一般的素子作製技術にも重要であり、大電力・高周波 SiC 素子の作製技術の研究にも貢献。
- ・半導体の放射線照射効果の研究成果は、地上の原子力施設・加速器施設で使用される半導体素子の開発へも波及する実用的成果である。
- ・PTFE(テフロン)の架橋技術は、日立電線（株）において超耐摩耗性の摺動部材や耐放射線性 PTFE として製品化試験が進められ、平成14年8月、科学技術振興事業団による委託開発制度で、工業化成功と認知された。
- ・放射線法で製造した高耐熱性 SiC 繊維が日本カーボン（株）で製造され、高性能素材として市場に提供されている。
- ・三井建設（株）と共同で開発したアラミド繊維強化樹脂複合材料は、電磁誘導防止の目的で以下の建築物に使用されている。

- ①日本原子力研究所 那珂研究所 大型変圧器基礎
- ②理化学研究所 ゲノム科学総合研究センターNMR棟 NMR基礎
- ③海洋科学技術センター 地球シミュレーター施設シミュレーター棟及び動力棟基礎
- ・開発された特許や技術を民間に波及させ、また産業的価値を生み出すため、原研支援ベンチャー制度を利用して3社のベンチャー企業が設立された。

### 3.2.2 評価結果

#### 3.2.2.1 項目別評価

##### 1) 機能材料創製の研究（主要課題領域1）

###### (a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 4.6 (5点満点に対する各委員の平均点。以下同じ)）

環境応答性膜、分離機能材料、エコマテリアルなど、放射線照射利用の技術協力を含め、ほぼ当初予定された成果が得られた。いずれの課題も、高度化された技術を基盤に一定水準の応用目的を達成しており、全体に優れた達成度であると評価できる。同時に、副次的に得られた成果も高く評価できる。

なかでも、高性能燃料電池膜の開発における市販膜の3倍のイオン交換容量達成の成果、有用金属捕集技術の開発における実海域試験でのウラン 1kg 捕集達成の成果は高く評価できる。他の競合する手法とのコスト、安全性など、競争力を強化し、実用化に結びつけ、大きな産業を生み出す開発の継続を期待している。

反面、無機機能材料については創製された材料の機能性を評価する試験が必ずしも充分ではなかった。また、新規性に富んだ基盤技術も少なく、さらなる進展が望まれる。

###### (b) 研究開発実施経過の妥当性（評価点 4.3）

共同、協力研究等、原研外部との協力、連携は積極的に進められていると評価する。予算、人員を考えると、進め方は妥当である。

ただ、社会的に有益な研究開発テーマがとりあげられ、認めうる成果を得ているが、テーマ数が多いために小粒なテーマおよび成果の寄せ集め的側面があることも否めず、例えば研究開発テーマの大きな方向づけ（学術的な原理に基づいた）が欲しいよう思う。

当該研究は応用面が重視されるであろうから、今後は、応用分野のニーズ等の調査を積極的に行うと共に、技術供与を積極的に展開すべきである。また、環境変化に応じてのテーマの探索・絞り込みや、フレキシブルな研究資源の対応が必要である。

さらに、「不成功」を「成功」に結びつけた事例は例示に留まらず、すべて集約し、分析して残す事が必要である。うまくいかなかつた事例、成功にいたるまでの様々な取り組みとその分析を貴重な資産として生かす事が重要である。また、共同研究等における役割分担を明確にしておく事は、共同研究等を実施する基本的な事であるので、資料として明確にして残すべきである。

###### (c) 人材育成（評価点 3.8）

特研生、リサーチフェロー等の数は後半増大傾向にあり、努力の表れと評価する。業務課題についても、海外からの受け入れ、派遣について、各年度相当数あり、妥当な成果である。また、共同、協力研究に加え、群馬大学との連携大学院による人事交流を通じて人材育成に寄与している状況を評価する。今後は特定の大学のみでなく、さらに広く若い人材を育成できる仕組みの発展と自由度の確保に期待する。成功のレベルの差はあっても良いので、環境変化を見越したテーマと人材の組合せを実現していく必要がある。さらに、今後とも、東南アジア地域には、積極的に貢献されることを特に望みたい。エネルギー利

用と違って放射線利用は東南アジア諸国でも受け入れやすく、経済規模、施設の安全性の上でも、その科学技術上の先進性においても、当研究所で行っている諸活動はアジア地域の発展にとって、非常に適切で価値の高いものである。また、海外の先進諸国との共同研究ももっと積極的に行うことを望みたい。

なお、特許、成果の取扱いはインセンティブになると思われる所以、良い方向になるよう検討することが必要である。

#### (d) 研究開発の成果の普及・波及効果（評価点 4.3）

海水中の有用金属の回収技術は波及効果、特に原子力政策へのインパクトも大きく、注目度が高い。ハーツラス TNF（トリニトロフルオレノン）、PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）、アラミド繊維材料なども大きな成果であり、波及効果があった。また、ハイドログル、ナノ細線の成果はイオンビームの特性を生かした成果である。今後はバイオ分野との連携によるテーマでの新たな産業育成を期待する。

研究の成果は、終了した研究を含めて、様々な課題の取り組みについてデータベース化しておくことが望ましく、実用可能な成果に関しては民間などへのテクノロジートランスファーを確実にかつ広く行っていくことを期待する。当該分野の研究は、産業化に最も結びつきやすい研究項目であるだけに、あるいはそれがあつて初めて社会に対する研究の貢献の意味がある課題であるだけに、積極的な普及活動に取り組むことが重要である。原子力という分野のなかで、実績からいっても、もっとも強力に、宣伝できるし、後顧の憂いなく宣伝すべき分野である。一方、一般国民は、まだまだ放射線利用が、ここまで進んで社会に利用されている事実を認識していないと思われる所以、今まで以上に格段の宣伝活動が必要ではないかと感ずる。

#### (e) 将来への研究開発の展開（評価点 4.0）

放射線グラフト重合による高性能吸着材料消臭剤実用化、床ずれ予防マットの開発、高性能イオン交換樹脂膜開発など、製品化、商品シーズ開発両面で成果をあげている。材料創製は、心身の健康の増進、福祉介護、携帯電話・自動車などの巨大産業への展開が望める分野であり、大きな経済効果、社会効果が期待できる。今後は実用化の可能性に向けた経済性等の評価が重要である。信頼性の高い経済性評価に基づいた、一層のコスト低減のための研究開発を進めて欲しい。

また、イオン穿孔でのナノ部品開発は、今後期待される分野である。せっかくの技術開発を無駄にしないよう、さまざまな製品を具体的にイメージできる協力者を積極的に探索し、協力を得て、実用化を着実に進展させることを期待する。

さらに、ハイドログル創傷被覆材など、すでに具体的な実用化が始まったものもあるが、「分子ふるい」のバイオ・医薬応用も大きな社会的・経済的効用が望める。実用化への課題を着実に解決し、産業に結びつけて欲しい。

なお、研究の計画立案に際しては、イオンビームを使ってまでも普及可能となるような付加価値の高い成果が得られるかの十分な検討が必要である。そのためにも、5カ年の研

究活動の過程で得られた将来の研究開発の芽を整理し、残しておくことが重要である。

## 2) 放射線環境材料評価の研究（主要課題領域 2）

### (a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 4.5）

原研高崎研究所ならではの幅広い研究が行われており、いずれの研究課題に対しても、顕著な研究実績をあげている。水準的にも満足できるレベルで、当初の目的は達成している。半導体材料、陽電子ビーム利用研究については、達成度は高い。

耐放射線性材料（有機及び半導体）の研究は高崎研究所が長年手がけてきたテーマであり、陽電子ビームにおいては分析技術の開発においてその成果は大きい。有機材料、原子炉用電線の研究の成果は十分である。耐放射線性の半導体材料・素子の開発と、宇宙用半導体の耐放射線性評価技術の開発などは、トランジスタ試作まで進み、世界に誇れる、優れた成果をあげており評価できる。SiC はメーカには是非入ってもらい、電力用ビーム発生用高電圧スイッチングなどへの応用を考え、基礎研究の成果を生かすよう努力して欲しい。

今後は、この間に集積されたデータを整理して体系化することが重要である。また、原子力耐環境材料の開発は思い付きによる雑多な技術開発となっている印象を与え、組織的な開発戦略が見えない傾向にあるので、これを明確にして進めることが必要である。

### (b) 研究開発実施経過の妥当性（評価点 4.0）

成果の実用化という面で、原研内外との協力・連携がよく生かされた技術開発が行われたと評価できる。予算、人員を考えると、進め方は概ね妥当である。但し、追加予算の有効利用など、予定外の事態は常に想定されるので、これら予定外の計画にも、充分対処が可能なフレキシブルな体制で実行に臨んでもらいたかったし、また、有機材料について、もう少しつつこんだ研究展開が必要であったように思う。

原子炉用電線の経年変化に関する研究は事前評価における指摘により、H10 年に終了している。これは柔軟な対応措置として妥当と考える。JEC-6152-1996 への採用は重要な成果ではあるが、今回の評価対象期間以前のものである。更なるデータの整理、体系化を願う。また、陽電子ビーム利用技術がこの領域に入れられたのは、恐らく半導体の照射効果の研究へ応用するという目標があったと理解するが、今後の高崎研究所におけるこの分野の研究をどう進めるか再検討が必要と感ずる。

さらに、今後、「不成功」を「成功」に結びつけた事例は例示に留まらず、すべて集約し、分析して残す事が必要である。うまくいかなかつた事例、成功にいたるまでの様々な取り組みとその分析を貴重な資産として生かす事が重要である。また、共同研究等における役割分担を明確にしておく事は、共同研究等を実施する基本的な事であるので、資料として明確にして残すべきである。

### (c) 人材育成（評価点 3.5）

この分野は高崎研究所において比較的新しい分野であるが、しっかりした基礎が出来つつあるように見える。共同、受託、協力研究など、大変良好な実績があり、評価できるが、

特研生、外来研究員の数の減少が見られ、やや弱体化の傾向があるのではないかと危惧する。有機材料系の研究者の減少は今後の研究展開に対し少なからず問題を残すことも予想される。組織変更などの環境変化に応じたフレキシブルな人材交流・育成がより必要となる。放射線利用の研究開発が可能な研究機関は限られているので、もっと積極的な人材育成体制が必要ではないかと感ずる。

#### (d) 研究開発の成果の普及・波及効果（評価点 3.9）

社会への普及は見えにくいテーマではあるが、半導体の耐放射線性、原子炉用電線経年変化など、重要な研究を実施している。陽電子ビーム利用の可能性を示した成果（陽電子回折）は学術的にも波及効果がある。SiC 中の欠陥研究は有効であり、民生用（SiC）への貢献も重要である。分析技術の普及は他の分野への影響が大きいので、成果の積極的な活用をさらに具体化して欲しい。また、PTFE 工業化の成功など、着実に成果を積み重ねており、製品改良技術開発などを通しての、市場投入された製品の普及への貢献も期待している。

原子炉用電線の経年変化は原子力発電プラントの高経年化対応にとって重要な課題である。これまでの研究成果を評価するが、これが社会的には余り見えていない気がする。この面での国のプロジェクト研究が開始されており、高崎研究所の成果の有効利用を図る方策、貢献の仕方について、もう一度良く検討し直すべきである。さらに、今後、終了したものと含めて、様々な課題の取り組みについてデータベース化しておくことが望まれる。

#### (e) 将来への研究開発の展開（評価点 4.0）

半導体材料の陽電子回析による世界初の一次ラウエ帯計測、炭素ケイ素セラミックのマイクロチューブ開発、円盤状セラミック微少部品試作の成功などにつなげることができた点は新規材料開発として優れた成果である。耐放射線性の素子やセンサーは原子力産業における遠隔システムの開発に強いニーズがある。地上でのニーズもよく把握した上で、次期計画も積極的な展開を図って欲しい。また、陽電子ビーム利用技術を発展させることは広い範囲で意義のあることである。他の研究機関では実施しにくいテーマであるので、世の中に普及する商品像の具体的イメージを持つことの出来るパートナーを見つけ、新産業創出、大きな経済効果に結びつけて欲しい。さらに、有機材料、原子炉用電線ケーブルの研究のデータベースの改良と普及に尽力を願いたい。

今後の研究の効率的な展開のためには、5 カ年の研究活動の過程で得られた将来の研究開発の芽を整理し、残しておくことも必要である。

#### 3.2.2.2 その他の所見

上記以外の所感、問題点、提言等、各委員の所見を以下に列記する。

○基礎と応用のバランスをとるためにも、外部資源の活用は重要である。これまでにも増した組織横断的連携・選択と集中による成果達成のスピードアップと、新たな技術開発

とを両立させていく必要がある。

○優れた技術開発を効果的に産業につなげるためには、さまざまな製品を具体的にイメージできる協力者を積極的に探索し、協力を得て、実用化を着実に進展させることが重要である。

○国の機関の一環である原研でしか、着実にできないことなので、継続必須の課題である。

### 3.3 環境・資源利用研究部の研究開発

#### 3.3.1 研究開発課題の概要

放射線の化学・生物作用と解析プローブとしての有用性を活かした先導的な技術開発を進め、地球環境の保全や食糧資源の確保などに係わる課題の解決に貢献するとともに、世界をリードする独創的な技術を基盤とした新産業の育成を目指す。

##### 3.3.1.1 主要課題領域の構成、研究開発目標及び成果

###### [主要課題領域の構成及び目標]

###### (1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発（主要課題領域1）（環境保全技術研究室）

トリクロロエチレン等の揮発性有機化合物の電子線による分解機構の解明及びアルカリ物質添加等の分解の高効率化を目標とする。クロロベンゼン等有機塩素化合物の分解機構を踏まえて、ダイオキシンの放射線照射分解について検討する。

###### (2) 生物資源の利用技術に関する研究（主要課題領域2）

###### 1) イオンビームによる植物資源創成の研究（イオンビーム植物資源利用研究室）

イオンビーム誘発突然変異の特異性を解明し、またその特徴を生かして基礎的及び実用的に有用な新遺伝子資源の創成を行う。同時に、イオンビームを用いた新しい植物育種技術を開発し、食糧資源の確保や環境保全に役立つ植物資源の創成とその利用を図る。

###### 2) バイオ技術への放射線利用の研究（バイオ技術研究室）

機能解析手段としてのマイクロビーム照射技術を確立し、バイオ分野や宇宙開発への新たな利用の展開を図る。また、イオンビーム等の放射線の生物影響に係わる遺伝子損傷の生成とその修復機構を分子レベルで解明し、ライフサイエンスの発展に資する。

###### 3) イオンビームによる生物機能解析の研究（生物機能研究室）

生物の機能を生きたままで計測するポジトロンイメージング技術の開発、及びイオンビームにより生成されるポジトロン放出核種等の利用・特性研究を行う。これにより生物の環境応答機能を解析・評価して、植物による劣化環境下での食糧生産技術・生物による環境浄化技術の開発に資するとともに、放射線治療・薬剤への応用を図る。

###### [主要課題領域の成果]

(1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発（主要課題領域1）	
1) 挥発性大気汚染物のエアロゾル化・除去に関する研究（環境保全技術研究室）	
当初の達成目標	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・揮発性有機塩素化合物等を含むモデル排ガスに電子線照射した場合の分解・脱塩素化やエアロゾル生成・成長機構を明らかにする。</li> <li>・得られた知見に基づき、分解やエアロゾル生成の高効率化の研究を行う。さらに、ガスからの分解生成物の効率的除去方法、生成したエアロゾルの除去に適した粒子径の制御や効率的捕集方法に関する研究を行う。</li> <li>・これらの成果をもとに実用プロセスの検討とその技術的・経済的評価を行う。</li> </ul>	
研究成果の内容	

- ・工場換気ガス中のトリクロロエチレン、クロロベンゼン、ジクロロメタンなどの揮発性有機化合物の電子線処理における、分解速度、分解生成物、水やアルカリ液添加効果等の反応挙動を明らかにした(H11)。
- ・特に、塩素ラジカルが関わる連鎖反応が見出されたトリクロロエチレンの分解に関しては、反応速度定数や連鎖長を調べるなど、連鎖反応の詳細を明らかにした(H11)。
- ・フィルム製造工程の換気ガス中に含まれるジクロロメタンの電子線分解については、照射中あるいは照射の合間に分解生成物を系外から除去することにより高効率化できることを見出した(H12)。
- ・キシレン等の芳香族系の化合物は、電子線照射によって分解するとともに、分解生成物の数 10% は粒径 100nm 程度のエアロゾルとなることを見出した(H11)。
- ・このようなエアロゾル化や帶電に寄与するイオンの挙動を明らかにするため、大気圧の空気中に含まれる微量成分を高感度連続計測できるキャピラリー導入型質量分析計を開発した(H12)。

## 2) 排煙中ダイオキシンの分解技術の開発（環境保全技術研究室）

### 当初の達成目標

- ・実際のごみ燃焼排煙を対象に、電子ビームを用いて排煙中ダイオキシン類の分解技術の開発を行うとともに、その実用化を図る。
- ・モデル物質等を用いたラボ実験により、反応機構を解明する。
- ・ダイオキシン対策特別措置法施行により、平成 14 年 12 月からごみ焼却排煙中のダイオキシンの排出濃度規制が強化される。これへの対応のため、放射線によるダイオキシン分解・無害化技術の開発を平成 10 年度から行う。また、実排煙中ダイオキシンの分解試験を行い、これに基づき実用化を検討する。

### 研究成果の内容

- ・平成 12 年 11 月から平成 14 年 1 月の間、実際のごみ焼却場に、毎時 1,000 m<sup>3</sup> の排煙処理が可能なダイオキシンの電子線照射分解装置を設置して試験を行った(H13)。
- ・排煙試料の採取及びダイオキシンの抽出・精製・ガスクロ質量分析による標準定量手順を確立し、日本工業規格 (JIS) と同等の精度でかつ 2 週間程度を要する従来法の約半分の時間でダイオキシンの定量を可能にした(H12)。
- ・ダイオキシンの分解率(照射前に対する照射後のダイオキシン濃度の比)として、吸収線量 3 kGy で約 50%、10 kGy で約 80%、及び 14 kGy 以上では所期の目標である 90%以上が得られた(H13)。また、初期濃度が 1 ng/m<sup>3</sup> 程度の濃度が低いものについても、平成 14 年 12 月以降の新設炉に対する基準値の 0.1 ng/m<sup>3</sup> 以下にすることことができた(H13)。
- ・今回の試験規模を約 6 倍することにより 40,000 m<sup>3</sup>/h の実規模へのスケールアップが可能とみなされ、実用化に向けた有意な基礎データが得られた(H13)。
- ・照射した排煙の安全性の観点から、生成したエアロゾルの成分分析を行い、極微量の硫酸塩等が検出されたが、ダイオキシンから生じる有害有機物は含まれないことが確認できた(H13)。
- ・電子ビーム照射前後における排煙について、環境ホルモン様活性（女性ホルモン活性）を ELISA 法により調べた結果、活性を 50%以上低減できた(H13)。
- ・ジフェニルエーテル (DPE) や塩化DPE など、ベンゼン環やエーテル結合を持つ模擬有機物質を用いた、200°Cにおける反応生成物の解析による反応機構の推定から、ダイオキシンの分解初期では、構造を維持したままの塩素の解離よりもエーテル結合の切断やベンゼン環の開環が主として起こっていることを明らかにした(H13)。

## 3) 燃焼排煙処理技術の開発（環境保全技術研究室）

### 当初の達成目標

- ・国際原子力機関を支援して、ブルガリアのマリツツアイースト火力発電所で実施される高濃度硫黄酸化物を含む排煙の浄化プロジェクトを推進する。

- ・本協力では、専門家の派遣、情報提供を通じてパイロットプラント設計及び試験計画立案、硫黄酸化物並びに窒素酸化物の除去特性の把握、試験結果の解析を国際原子力機関及びブルガリアと共同で行う。
- ・電子線排煙処理技術に関する情報提供等を通じ、これまでに得られた成果を国内外に技術移転する。

#### 研究成果の内容

- ・ブルガリアのマリツツアイースト発電所燃焼排煙浄化プロジェクト計画に平成9年から平成14年の間、IAEA、ブルガリアとともに参加し、プラント建設を進めた(H10-13)。
- ・原研におけるラボ試験により、水分濃度や硫黄酸化物濃度をブルガリア排煙条件付近でパラメータとして変化させて脱硫率への影響を明らかにした(H12)。
- ・火力発電所における石炭燃焼排煙中の硫黄酸化物及び窒素酸化物の電子線除去プロセスを確立し技術移転協力を行った結果として、現在、中国及びポーランドにおいてそれぞれ平成9年及び平成13年に実規模プラントの運転を開始した。

#### 4) 水溶液中低分子有機化合物の放射線分解反応の基礎的研究（環境保全技術研究室）

##### 当初の達成目標

- ・アミノ酸やフェノール等の低分子有機物の水溶液中における高エネルギーの重イオンビーム照射によって誘発される酸化反応について、分解生成物の収率のイオン核種及びエネルギーとLET依存性を明らかにする。

##### 研究成果の内容

- ・水溶液中のフェニルアラニンやチロシンの高エネルギー重イオンビーム照射による分解反応について、重イオンの飛跡ごとに連続的に変化するLETに対する収率(微分G値)を調べることにより、いずれのイオン種においても低LET側ではガンマ線照射した場合の収率よりも大きな値を示し、LETの増加に伴いその値が減少することを明らかにした(H12)。
- ・同じLETではイオンの原子番号の増加に伴い収率が大きくなることを明らかにした(H13)。

#### (2) 生物資源の利用技術に関する研究（主要課題領域2）

##### 1) イオンビームによる植物資源創成の研究（イオンビーム植物資源利用研究室）

###### a) 有用遺伝子利用の研究

##### 当初の達成目標

- ・イオンビーム誘発突然変異の特異性を分子レベルで解明する。
- ・紫外線耐性作物などの優れた遺伝形質をもつ新規突然変異体をイオン照射によって作出する。
- ・上記有用突然変異体から基礎的及び実用的に有用な新規遺伝子を同定するとともに、これらの遺伝子利用を図る。

##### 研究成果の内容

- ・作出了30種のシロイスナズナ突然変異遺伝子を調べた結果、約半分に当たる14種では短い欠失などの遺伝子内の変異が生じているが、残りの16種では4つが遺伝子全体が消滅する大きな欠失を伴う変異、12が逆位や転座の変異を示し、遺伝子間に及ぶ大きなDNAの構造変化が生じていることを発見し、これがイオンビーム誘発変異の特徴であることを明らかにした(H13)。
- ・イオンビーム照射によって、モデル植物であるシロイスナズナで、全く新しい6つの紫外線感受性突然変異体を誘発するとともに、4つの紫外線耐性突然変異体の特徴解析を行った。また、1つの紫外線感受性系統については、ほぼ遺伝子の同定に成功した(H13)。
- ・イオンビーム照射により、初めて花びらを形作るフリル遺伝子の存在を見出した(H12)。
- ・全く新しい2系統の色素突然変異体を見出し、これらは色素合成の最終ステップに機能する重要な遺伝子の変異であることを明らかにした(H13)。
- ・DNA損傷・変異の可視化技術開発では、特定配列のPNAプローブにAlexa532蛍光色素を結合する

ことにより、光プローブ顕微鏡で1分子の観察が可能となり、遺伝子の可視化に初めて成功した(H13)。

#### b) 高度育種技術の開発

##### 当初の達成目標

- ・イオンビームの深度制御照射による遺伝子導入技術の確立を行う。
- ・新品種を作り出す基盤となる先端的育種技術の開発を図る。
- ・突然変異制御技術の開発やマイクロビーム照射技術などの開発を行うため、植物細胞に対するイオン照射効果を明らかにする。

##### 研究成果の内容

- ・新規遺伝子導入技術の開発では、外来遺伝子の照射花粉への取り込みの最適導入条件を明らかにし、米国特許を取得した(H12)。
- ・イオンビームは突然変異の誘発だけでなく、交雑不親和性の打破に非常に有効であることを明らかにした(H10)。
- ・キクにおいて、従来方法では誘発できなかった複色や条斑などの新花色の創成に成功した(H10)。
- ・半数体培養系とイオンビームを組み合わせることによって、高頻度でウィルス抵抗性タバコを作出できることができた(H11)。
- ・カーネーションを用いた研究では、培養細胞・組織系と炭素イオン照射を組み合わせることによって、原種のチェリー色から赤や桃色に加えて、X線やガンマ線、また化学変異剤では困難であった黄色やサーモンなど数種の新花色が得られただけでなく、花形も原種の剣弁から程度が様々な丸弁が得られた(H13)。
- ・以上から、変異原としてイオンビームは非常に有効であり、耐病性などの品種改良や花色や花形などの新品種作出にも利用が期待されるなど、誘発変異のスペクトルが広いという特徴を持つことがわかった。

#### 2) バイオ技術への放射線利用の研究 (バイオ技術研究室)

##### a) 細胞局部照射効果の研究

##### 当初の達成目標

- ・カイコ発生初期卵に対する局部照射の影響を解析し、組織原基分布図を作成する。
- ・マイクロビームを用いたシングルイオン細胞照射技術を確立する。
- ・細胞核に対するシングルイオン照射の生物影響を明らかにする。

##### 研究成果の内容

- ・細胞性胞胚期のカイコ卵への局部照射部位と胚子の形態異常発生部位との間に密接な関係があることを見出し、この対応関係に基づいて細胞性胞胚期における組織原基分布図（発生運命予定地図）を作成した(H11)。
- ・重イオンマイクロビームを用いて、生きた細胞の核を狙って正確な個数の重イオンを大気中で照射し、さらに個々の細胞について生育・増殖への影響や細胞の放射線応答を長時間にわたって追跡観察できる実験系を世界で初めて確立した(H13)。
- ・この実験系を用いて、哺乳動物細胞の核への高LET重イオン1ヒットによる増殖阻害効果を実験的に示すことに成功した(H13)。
- ・照射された細胞と同一の培養シャーレにある照射されていない細胞において、照射細胞と同様に分裂増殖が阻害されるバイスタンダー効果が観察された(H13)。
- ・個々の細胞に対するイオンのヒット数及びその位置の確認と、コメットアッセイによるDNA2本鎖切断の定量を、同一細胞について同時に行う方法を開発した(H13)。

##### b) 放射線耐性機構の研究

##### 当初の達成目標

- ・新規DNA修復系遺伝子(*pprA*)の機能を解明する。

- ・放射線抵抗性細菌における DNA 修復機構の全容を解明する。
- ・イオン照射で生じると予想される DNA 損傷の特徴を放射線化学的に解明する。

#### 研究成果の内容

- ・ゲノム情報に基づいて遺伝子破壊変異株を効率的に作製するために、薬剤耐性遺伝子カセット及び薬剤耐性プラスミド導入による特定遺伝子破壊法を開発した (H11)。
- ・放射線高感受性変異株 KH840 の遺伝的不安定性はトランスポゾン転移によることを明らかにするとともに、本変異株の感受性原因遺伝子 *pprI*を見出し、この遺伝子が *recA* 及び *pprA* 遺伝子の発現誘導を担っていることを突きとめた (H11)。
- ・放射線抵抗性細菌のゲノム地図を作成して、ゲノムが複数の環状 DNA から構成されること、ゲノムが多量体として存在すること等を明らかにした (H11)。
- ・放射線抵抗性細菌の新規 DNA 修復遺伝子 *pprA* の産物である PprA 蛋白質が、DNA 切断部位を認識してそこに結合することを発見した (H12)。
- ・放射線抵抗性細菌には PprA と RecA の共同による組換え修復とは別に、LexA 蛋白質の制御を受けた未知の DNA 修復系が存在し、これが極めて高い放射線耐性の原因のひとつであることを明らかにした (H12)。
- ・放射線抵抗性細菌の新規 DNA 修復遺伝子 *pprA* の産物である PprA 蛋白質が T4 ファージ DNA リガーゼの活性を促進することを見出し、PprA 蛋白質が遺伝子工学用試薬としても実用化できることを示した (H13)。
- ・また、PprA 蛋白質によって RecA 蛋白質による DNA の組換え反応が促進されることを明らかにした (H13)。

#### c) 食品照射調査・研究

##### 当初の達成目標

- ・これまでに整備してきた食品照射データベースの管理・運用、追加入力を行う。
- ・放射線による害虫不活性化、生薬の殺菌等の食品照射関連データベース整備を行う。
- ・食中毒菌の放射線感受性等、食品照射関係の試験研究を行う。

##### 研究成果の内容

- ・乾燥食品の放射線殺菌効果に及ぼす線量率や食品含有成分の影響を、医療器具の放射線滅菌の指標菌である芽胞形成細菌を用いて明らかにした (H12)。
- ・食品照射に関する研究成果のデータベースに新たに文献 5 件を追加した (H13)。
- ・照射履歴線量を推定するために、食品中の DNA に照射によって生じた極微量の特徴的な放射線損傷を ELISA 法で検出・定量する条件を検討し、検知法として有望であることを示した (H13)。

### 3) イオンビームによる生物機能解析の研究 (生物機能研究室)

#### a) 植物の環境応答研究

##### 当初の達成目標

- ・ポジトロン放出核種を用いて、環境変化に対する植物の応答を非破壊で計測する技術として、植物体内における物質の移行計測条件、計測の定量化法を確立する。
- ・イオンビームを用いて、ターゲット照射技術、化学分離技術、標識化合物合成技術を開発する。植物生体機能研究用ポジトロン放出核種として、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N など生体構成元素 RI や <sup>18</sup>F 標識生体関連化合物の開発及び標識化合物合成の自動化を図る。また、生体微量元素の働きを調べるために <sup>48</sup>V や <sup>52</sup>Mn の製造研究を行う。
- ・確立した計測技術を用い、劣化環境ストレスに対する植物の応答について非破壊計測・動的解析を行う。
- ・植物の栄養特性に関する研究については、栄養素や微量元素の過不足に対する植物の応答を検討する。特に、<sup>13</sup>N 及び <sup>11</sup>C 標識化合物を用いて、窒素や炭素の吸収・移行を中心に研究を行う。

##### 研究成果の内容

- ・ポジトロンイメージング装置を用いた計測技術として、植物内ポジトロンを高感度で効率よく検

出する技術及び定量化技術を開発した(H11)。

- ・イメージング画像上の任意の領域で放射能量変化の解析が行えるよう、データ解析プログラムの改良を行った。また、イメージング画像の広視野化に適したポジトロンカメラの最適配置条件を検討し、視野を  $22 \times 14$  cm に拡大して植物個体全体を視野内に収めた計測を可能とした (H13)。
- ・植物環境応答研究に有用なポジトロン核種として、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  など生体構成元素、 $^{18}\text{F}$  標識化合物、金属元素として  $^{48}\text{V}$ 、 $^{52}\text{Fe}$ 、 $^{52}\text{Mn}$  や  $^{62}\text{Zn}$  などの製造技術を確立した。標識化合物合成技術の開発では、 $^{18}\text{F}$  標識プロリンなどアミノ酸の合成技術を開発し、代謝機能の解析を可能にした (H13)。
- ・ $^{11}\text{CO}_2$  を用いて光合成産物の植物体内における動態計測を可能にした結果、光合成産物を蓄積する組織の外的環境が光合成産物の移行過程を強く制御することをはじめて明らかにした。また、ソラマメの特定葉の高濃度  $\text{CO}_2$  環境に対する応答として、光合成産物の生成量が増大するだけでなく、より速く葉から送出することを見出した (H13)。
- ・葉表面への硝酸水溶液塗布の影響について調べ、吸収された  $^{13}\text{N}$  標識硝酸イオンは緩やかに周囲に拡散して行くこと、硝酸濃度が低くなるにつれて障害発現時間は遅延し、気孔が閉じる速度も緩やかになることを見出し、劣化環境に対する植物の応答を明らかにした (H10)。
- ・高塩濃度 (0.5% NaCl) 環境下のオオムギにおいて  $^{11}\text{C}$ -標識メチオニン（必須アミノ酸）の吸収が著しく増加し、塩ストレスに対する生体の防御機構の解明に役立つ知見が得られた (H12)。
- ・生体微量元素を用いた試験では、亜鉛欠乏環境下のイネを用いて  $^{62}\text{Zn}$  イオンの葉中での移行に周期性があることを用いて初めて見出した。土壤汚染で問題となる  $^{48}\text{V}$  は通常は根に蓄積されるが、リン欠乏状態で育成させたダイズでは  $^{48}\text{V}$  の吸収量が増大しただけでなく地上部へも移行され、植物の環境応答性を計測できた (H13)。

#### b) 医学応用研究

##### 当初の達成目標

- ・オンライン同位体分離器 (ISOL) を RI イオン注入に用い、冠動脈狭窄治療用ステントに放射線源としての機能を持たせ、永久留置して再狭窄を防ぐ方法を開発する。
- ・イオン注入を高効率で安定して行うイオン源の開発、およびステントに均一にイオン注入するための技術を確立する。
- ・RI 注入ステントからの漏洩 RI 量の低減を図るために、密封性能向上技術の開発を行う。

##### 研究成果の内容

- ・冠動脈再狭窄予防用線源の開発では、ステント内に注入した  $^{133}\text{Xe}$  イオンの分布を制御する技術を開発し、ステントの  $^{133}\text{Xe}$  イオン注入部位で再狭窄抑制効果が得られることを動物実験で明らかにした (H12)。
- ・従来用いていたイオン源に替え、小型 ECR イオン源を ISOL に設置し、希ガスで最大数十%のイオン化効率を得ることにより高線量率ステントの作製を可能にし、再狭窄予防効果試験が効果的に行えるようになった (H13)。
- ・レーザー加工によるステント製作時や  $^{133}\text{Xe}$  イオン注入時に受けた表面酸化皮膜の損傷回復のために、注入後のステントに熱水処理を施した結果、熱水処理を施さないものに比べて  $^{133}\text{Xe}$  の漏出量は 10 分の 1 以下に低減し、密封性能を向上させた (H13)。
- ・RI 内包フラーレンの研究では、Ni 板に蒸着したフラーレンをターゲットとした ISOL での  $^{133}\text{Xe}$  イオン注入により、 $^{133}\text{Xe}$  内包フラーレンの生成に成功した (H13)。

### 3.3.1.2 研究資源の実績

	予算(平成10年～平成13年度)(百万円)						人員(人・年)
	研究費	運転 維持費	研究 設備費	その他	特別 会計等	合計	
1. 環境保全に対する放射線利用技術の開発(主要課題領域1)							
小計	321+270	12	0	0	10	333+270	30
2. 生物資源の利用技術に関する研究(主要課題領域2)							
小計	396+243	115	0	0	0	511+243	65+4
総計	717+513	127	0	0	10	844+513	95+4

注：平成11年の研究費の+は、補正予算を示す。

### 3.3.1.3 人材育成

#### (1) 主要課題領域1：環境保全に対する放射線利用技術の開発

- ・実際のごみ焼却施設における電子ビーム照射装置や分解試験装置の運転、有害ガス処理プロセスの開発に従事することを通じて、広範な分野の技術に関して人材育成ができた。また、講習会等への参加も活用して職員を育成した。
- ・外部との人事交流では、修士3名、学生実習生10名を受け入れた。
- ・学生以外にも特別研究生、協力研究員や交流制度による外国人の受け入れも行った。

#### (2) 主要課題領域2：生物資源の利用技術に関する研究

- ・4年間で、特別研究生18名、学生実習生9名、交流制度による外国人15名、STAフェロー3名を受け入れた。
- ・バイオ技術への放射線利用の研究では、3人が各々工学、理学、農学博士を取得した。
- ・イオンビームによる生物機能解析の研究では、ポジトロンイメージングを用いた植物の機能解明に関する大学とのプロジェクト共同研究、イオンビームの医学への応用に関する大学との協力研究等により、双方の人材が養成できた。人数は少ないものの、修士取得に貢献するとともに、数名の学位取得予定者がいる。

### 3.3.1.4 所内外との研究協力

#### (1) 主要課題領域1：環境保全に対する放射線利用技術の開発

- ・揮発性有機物の除去技術では、木質材料中のホルマリン処理除去に対する電子ビームの有用性を示した大日本印刷との共同研究、写真フィルム成形工程の換気ガス中のジクロルメタンをアルカリ処理との併用でほぼ100%分解する技術を開発した富士写真フィルムとの共同研究、電子ビーム照射により生じるエアロゾルの粒径等の性状分析に関する技術開発した広島大学と協力研究をそれぞれ行った。
- ・ブルガリアのマリツツアイースト発電所燃焼排煙浄化プロジェクト計画で、平成9年から平成14年の間、IAEA、ブルガリアとともにプラント建設を進めた。また、荏原製作所との共同研究も活用して、原研でラボ試験を行い、水分濃度や硫黄酸化物濃度(特に高濃度の範囲)をブルガリア排煙条件付近でパラメータ変化させて脱硫率への影響を明

らかにし、電子ビームによる処理技術の実効性を明らかにした。

- ・低分子有機物のイオンビーム照射効果研究に関して、ポリジメチルシロキサンのイオントラック内における架橋反応現象を明らかにした北海道大学との協力研究、及びアルカンやポリスチレンのイオン照射下における励起状態を明らかにした大阪大学と協力研究をそれぞれ行った。

## (2) 主要課題領域2：生物資源の利用技術に関する研究

- ・生物学分野への新たな放射線利用の展開を図るため、大学等との協力・共同研究を積極的に進めた。
- ・有用遺伝子利用の研究におけるDNA損傷・変異の可視化技術開発では、生物系特定産業技術研究推進機構の公募研究が採択され、受託研究としてナノFISH法の開発を進め、遺伝子の可視化に成功するという、予想以上の成果を得ることができた。一方、高度育種技術の開発では、平成10年度から数多くの協力研究（京都府大など6大学）、および共同研究（農業生物資源研など14機関）を行うことによって多種類の植物種でイオンビームによる突然変異育種技術の有効性を試験することができ、キクとカーネーションにおいては世界で初めて品種登録を行い、実用化に向かっている。
- ・バイオ技術への放射線利用の研究での外部機関との研究協力では、ドイツ重イオン研究所(GSI)との研究協力によって細胞・DNAへの重イオン照射効果のLET依存性の解析などで成果をあげ、さらに平成11年度から5年計画の原子力基盤クロスオーバー研究「放射線障害修復機構の可視化による生体機能解明研究」の一環として、原研・東海研（保健物理部）、理研などと協力して放射線抵抗性細菌のDNA修復に係わる遺伝子の単離・同定と解析を進め、DNA修復の分子機構の解明において中心的な役割を果たした。
- ・ポジトロンイメージング計測技術を浜松ホトニクス(株)と協力して開発し、基礎研究を基盤とした原研・大学プロジェクト共同研究を実施した。民間企業との協力による独創的な装置の開発、計測及び解析技術の開発に世界に先駆けて成功し、大学とのプロジェクト共同研究により植物の環境応答機構の解明研究を進展させることができた。また、イオンビームの医学への応用に関する大学との協力研究等により、項線量率<sup>133</sup>Xeステンプの製造及びRI内包フラーレンの生成法を開発し、新規RI治療技術への応用に当初の目標以上の成果を得た。

### 3.3.1.5 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果

#### 主要課題領域1：環境保全に対する放射線利用技術の開発

- ・揮発性有機化合物については、1999年に成立したPRTR法により、電子ビームによる分解技術が有望視され、今後様々な製造プロセスにおいてその利用が期待されている。
- ・ダイオキシン分解技術は、燃焼排煙の他、飛灰や排水等に対しても技術導入が可能であり、使用済み焼却炉解体作業換気ガスを対象とした技術開発が、現在大成建設(株)との共同研究により進んでいる。また、既存法のバグフィルターは活性炭噴霧による捕集技術であるため2次処理を必要とするが、電子ビーム法はこれを必要としないため、環

境負荷低減技術として今後期待できる。

- ・排煙処理技術の開発では、大気汚染が深刻な中国及び東欧諸国で原研の技術が実用化されており、環境分野における日本の国際協力の点で今後も期待できる。
- ・揮発性有機化合物に関する研究で開発したキャピラリー式質量分析計は、リアルタイムの環境汚染物質の検出器、モニターの開発への展開が期待できる。
- ・ダイオキシンの分解技術については、ppt レベルのダイオキシンに対して 90%以上分解率を達成したことから、今後排水中の環境ホルモンや医薬品類など極微量有害物の分解・除去技術としての利用が期待できる。
- ・高線量率の放射線照射により水溶液中に生成するナノサイズ粒子に関する研究は、この現象を利用した新規の水処理技術の開発につながるだけでなく、新しい材料の製造技術として期待できる。

## 主要課題領域 2：生物資源の利用技術に関する研究

- ・イオンビームによる高度育種技術の開発では、高頻度の新規突然変異体の誘発により、イネ、ムギ、タバコでの耐病性品種の育成に成功し、またキクやカーネーションでは実用化に繋がる品種育成を達成した。これらのイオンビーム育種技術は、世界に先駆けて原研で先導的に行ってきましたものであり、日本独自の先端技術であるとともに、国の重点研究開発課題であるライフサンエンスに大きく貢献する。
- ・有用遺伝子利用の研究では、植物では全く新しい突然変異体の誘発とその原因遺伝子の同定を行った。シロイスナズナとイネでのゲノムプロジェクトが終了し、今後は遺伝子の機能解明に向けた研究が世界的に広まってきている。このような状況の中で、植物研究で最も必要とされているのは、目的とする遺伝子の破壊系の開発であり、イオンビームによる新規遺伝子の変異誘発は、植物遺伝子資源の探索とその利用分野に大きく寄与する。
- ・イオンビームの直進性と高い生物効果を活かしたラジオマイクロサーチャリ技術は、従来の外科的手法に代わる新しい機能解析手段として生物の発生・分化過程や形態形成過程の解明に利用され、生体防御機構や脳機能の解明など、高次の生命現象の解明に寄与すると期待される。さらに本技術を用いた胚・細胞の微細加工によって、新しいバイオ産業の創出が期待される。
- ・有用遺伝子利用の研究により、イオンビームによって新しい突然変異体が効率よく誘発できることが明らかとなつたため、植物学や遺伝学、また分子生物学の研究者からイオンビーム利用の提案があり、幾つかはすでに協力・共同研究として開始している。また新規に誘発した色素欠損突然変異体は植物生理学的に重要な研究材料であり、世界的権威の研究者たちから 3 件の突然変異体の分譲依頼に応じた。
- ・高度育種技術の開発では、キクの新花色やカーネーションの新品種シリーズ作出などの成功から、植物育種における新しい技術として注目を浴びており、プロジェクトの提案や共同研究が急速に増加している。
- ・マイクロビームを用いて細胞の核を狙って正確な個数の重イオンを照射する実験系を世

界で初めて確立した。この新しい照射実験手法で得られるデータは、放射線リスク評価において極めて重要な、極低線量域での生物影響の基盤となるとともに、宇宙放射線の影響評価や重粒子線癌治療効果の解析などにおいて直ちに実用に供することができ、重イオンの放射線生物研究に革新をもたらす。

- ・原子力基盤クロスオーバー研究「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、放射線抵抗性細菌の新規 DNA 修復系遺伝子を発見するなど、DNA 修復の分子機構の解明において中心的な役割を果たした。この修復系の模倣システムを高等生物で構築することによって、放射線防護や発癌・老化の抑制など、国民医療・保健分野における貢献が期待され、宇宙での生物長期生存の可能性を開くなど、宇宙開発計画の進展にも大きく寄与すると期待される。
- ・食品照射技術の実用化と普及のためには、照射食品検知法（照射履歴線量評価法）の開発が不可欠である。H12 年末、全日本スペース協会から香辛料の放射線殺菌・殺虫処理に関する許可申請がなされており、許可された場合には、ELISA 法による DNA の放射線損傷の検出・定量技術が、照射香辛料にも適用可能な、新しい原理に基づく検知法として、食品照射の実用化に貢献すると期待される。
- ・重イオン局部照射によって体内の特定の細胞や組織・器官を殺滅するラジオマイクロサーチャリ技術は、従来の外科的手法に代わる新しい機能解析技術として、生物の発生・分化過程や脳機能解明など、生命機能解明研究への応用が期待される。さらに、細胞・組織の微細加工技術として、突然変異の方向性制御や生体機能制御を通じて、昆虫・小動物における有用物質生産系の開発など、新たなバイオ産業の創出への波及効果が期待される。
- ・放射線抵抗性細菌で見出された放射線応答に関連する蛋白質群は、DNA 傷害マーカーや生物線量計としての実用化が期待される。また、PprA 蛋白質は、試験管内での DNA 結合反応や DNA 組換え反応を促進することから、DNA クローニング用試薬として遺伝子工学分野での実用化が検討されている。
- ・放射線抵抗性細菌の DNA 修復系遺伝子の発見は、生物進化の過程で生命維持機能の根幹をなす DNA 修復系がどのように進化してきたかを解明する手がかりを与えるものであり、生命の起源や進化を探究する基礎生物学的に重要である。また、放射線抵抗性細菌の極めて高い DNA 修復機構の全容を解明することによって、生物にはまだ知られていない修復能力が秘められていることを示すことができる。
- ・植物の環境応答に関する研究は、地球温暖化、酸性雨など地球規模、あるいは環境ホルモンに代表される有害化学物質による汚染など、水、地、大気圏での環境汚染の生態系に対する影響評価に寄与すると考えられ、国の環境行政に合致するものである。植物の環境応答研究および原研・大学プロジェクト共同研究を通じて得られた、高濃度炭酸ガス環境に対する植物の応答研究の成果などは、単に植物生理学的な意義を持つだけではなく、平成 10 年公布・施行の「地球温暖化対策の推進に関する法律」で植物による炭酸ガス吸収を国策として行うこととしており、この方針を推進する。
- ・開発したポジトロンイメージング装置は、医学分野で利用されている PET に比べ、低コ

ストで解像度の良い二次元画像が得られ、既に小動物を対象とした利用可能性の検討が進められている。また、<sup>133</sup>Xe 注入ステントの開発に関する研究では、群馬大学医学部との協力研究で再狭窄発生の機序の解明を進めている。これらは、生命科学の進展に大きく貢献する。

- ・植物内での物質移行を、画像として明示できるポジトロンイメージング技術は、植物を対象とした画像診断技術開発への展開が期待でき、植物の環境応答研究を通じて高度化したポジトロンイメージング技術は、外から見ただけでは判断の難しい、植物の健康状態診断技術開発への展開が期待できる。<sup>133</sup>Xe 注入ステントの開発では、密封線源化の目途をつけることにより実用化が可能となり、臨床における再狭窄率の低減が期待できる。

### 3.3.2 評価結果

#### 3.3.2.1 項目別評価

##### 1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発（主要課題領域1）

###### (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平均点。以下同じ)）

電子線を用いた環境汚染物の分解機構の解明など、研究開発が確実に進んでおり、実用性も含めて、目的達成度は高い。なかでも、揮発性有機化合物の研究は大きな成果が得られており、実用化を推進して欲しい。また、排煙・ダイオキシンの浄化プロセスの開発における平成11年度地球環境技術賞受賞、ダイオキシン90%分解（高浜クリーンセンター）などの成果はすばらしい。他の手法とのコスト、安全性などの競争力でも十分価値のある真の実用化事例となるよう発展させて欲しい。

今後、燃焼排煙処理技術は民間への技術移転が終わったとした上で、なお原研が実施すべき課題を明確にして進めるとともに、既に走りだしている水溶液中低分子有機化合物の放射線分解に関する研究の意義と狙いを明確にして進めることが重要である。当該分野は着想のよいテーマが多く、将来的には放射線応用の主流となりうる技術であると思われる所以、基礎的データの蓄積と系統的な解析を進め、是非メジャーな技術への転換を願いたい。

###### (b) 研究開発実施経過の妥当性（評価点 4.3）

ダイオキシン分解研究は事前評価等の指摘を取り入れたもので、妥当な対応であり、制約の多いなか、高浜センターとの協力・連携やブルガリア、中国、ポーランドなどとの国際的な協力・連携、技術移転が進められた。実用化への尽力と内外連携の実現など、これまでの経過としては妥当であり、評価できる。この研究は、既存技術との比較や経済性評価を行った上で、進めることが重要である。技術の展開には外部との議論を活発化し、無駄のない効率的な展開をお願いしたい。人員を充実することも必要と思われる。

なお、研究途上での「技術的課題の解決や改善内容」こそが、評価において重要であり、この後の研究につながるものである。その分析は、今後の研究の貴重な資料となるものである。すべての事例について、資料として残すべきである。また、共同研究等における役割分担を明確にしておくことは、共同研究等を実施する基本的な事である。

###### (c) 人材育成（評価点 3.2）

積極的な実用化への取り組みによる人事交流や学生実習の受け入れはあるものの、人材育成の努力は余り感じられない。外部との人事交流やフェローの数が、他の分野に比べて若干少ないように感じる。修士3名、学生10名とのことだが、育成という意味ではもっと受け入れるべきであり、環境変化に応じたフレキシブルな人事交流が必要である。環境関連のテーマは幅広い分野の知識が必要であり、人材的に、一層の交流を図って、将来の実用化に向けての対外的な協力関係の強化と、人材育成に積極的な姿勢が望まれる。環境保全技術開発関連の研究者や、対象としている分野が、やや縮小気味なのが気になるが、放射線利用を経験できる場所が限られている現状では、国内における重要な役割を担つてお

り、人材育成に一層貢献する事が望まれる。

**(d) 研究開発の成果の普及・波及効果（評価点 4.2）**

大気汚染物のエアロゾル化・除去及びダイオキシン分解技術は社会へ放射線利用技術をアピールする上で重要と考える。地球環境の改善に資する事例となるテーマで実績を多く上げており、燃焼排煙処理技術などは着実に普及が進展し、国際貢献も顕著で、波及効果は期待できる。高崎研究所の中でも直近の社会的影響という意味では、最右翼に属する課題と思われるが、競争技術が多い分野であり、コスト的にみた検討も民間を交えて活発に行って、開発技術の真の実用化と普及・定着に継続努力して欲しい。材料合成、分析技術などは今後へ向けた波及効果が見込まれる。

有毒有機物や汚染物の分解については、電子線法の有効性の実証、ダイオキシンの短時間定量技術の確立など、技術開発の観点からの達成度は高いが、実用プラント建設への適用にはさらに社会的受容性に関する障害があるように見える。これをどう克服するかが課題であろう。

**(e) 将来への研究開発の展開（評価点 4.0）**

生活に密着した身近なテーマが多く、この分野での成功は放射線の有用性を理解してもう上で、極めて有効である。情報の発信を積極的に行って、技術の実用化を目指して頑張って欲しい。ダイオキシンの電子ビーム分解、燃焼排煙処理技術などは、実用化しつつあるものを確実に世の中に定着させて欲しい。さらに水への応用も重要である。

環境分野の技術へは、ユニークな方法でも可能性があるならば技術検討を行うべきであり、積極的な計画、研究員の充実を図り、実用化への問題点の解決に向けて取り組んで欲しい。そのためにも、研究活動の過程で得られた将来の研究開発の芽を整理し、残しておくことが必要である。

**2) 生物資源の利用技術に関する研究（主要課題領域 2）**

**(a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 4.8）**

多くのテーマで興味深い成果があがっており、全体に優れた達成度と高く評価される。当初の目標以外の様々な成果も得られており、実用化に向けての今後の更なる展開を期待したい。

植物資源創生研究では、イオンビーム特有の突然変異誘発機構の解明、細胞加工技術が進み、これまでになかった新形質をもつ素材の開発や新品種の育成など、世界に先駆けた成果を基礎面、応用面ともにあげており、高く評価できる。

バイオ技術分野のラジオマイクロサージェリ技術は、新たなバイオ産業の展開が期待できる開発であり、具体化を期待する。重イオンシングルヒットの影響を明らかにしたこと大きな成果である。

ポジトロンイメージングによる環境応答の解明は成果を確実に積み重ねている。植物PET の有効性が多くの研究者によって認識されるとともに、共同利用者が増加をしている

ことは高く評価できる。その有効性は世界的にも高い評価を得ている。今後も継続発展を願うとともに、得られた知見を実用的に利用する展開も期待する。さらに医学利用は今後とも是非継続して欲しいテーマである。

#### (b) 研究開発実施経過の妥当性（評価点 4.3）

生物資源利用技術に、より大きく重点を置いて進めている印象を受け、これは妥当な対応と判断する。展開も順調で、実用化への方向性がみられるものもある。協力・共同研究は大学、民間と、かなり積極的に展開した。生物機能解析での PETIS の世界的成果、また TIARA 10 年の基礎研究を活かしての世界 3 大花卉であるカーネーション、キクでの実用品種育成、品種登録出願、さらにカーネーションでは試験販売が開始されるまでに至ったことは大きな成果である。原研内外との協力・連携がうまく機能した実例として高く評価できる。ただ、ステントの研究をここに加えるのは場違いの印象を与える。

今後の研究実施にあたっては、照射用件が多いので照射効率の向上を図る必要がある。また、新しい検出法は非常に有効性があると思われる所以、応用面を積極的に展開する必要がある。SNOM での DNA 観察も有力な測定手段になると思われる。さらに、「不成功」を「成功」に結びつけた事例を例示に留まらず集約し、分析して残す事が必要である。事例から将来の課題が明らかになる場合も多く、分析結果と共にその取り組みを貴重な資産として残し、将来の研究に生かす事が重要である。また、共同研究等のテーマと相手側の一覧だけでなく、それぞれの役割分担を明確にしておく事は、共同研究等を実施する基本的な事である。役割分担を含めて資料として残すべきである。

#### (c) 人材育成（評価点 3.8）

植物資源創生、バイオ分野とともに、国内・国際交流両面で、着実な人材育成が行われており、バイオ分野のイオンビーム利用研究者の輪が拡がっているように見える。しかし、一部のテーマで人材育成の努力が感じられないものがある。イオンビームの生物応用は今後の大きな発展が期待される分野であり、さらなる人材育成を期待したい。協力・共同研究は多くなされているが、外部との人事交流や、人材育成（大学生、院生）の点での学生数をもう少し多くしてもよいと思われる。基礎部分は大学、応用部分は企業と、メリハリをつけて、さらなる人材育成への努力をお願いしたい。

#### (d) 研究開発の成果の普及・波及効果（評価点 4.6）

本研究には社会的影響が大きなテーマが多く含まれており、波及効果は大きい。DNA 修復機構の分子・原子レベルでの研究は原子力分野において関心の高い低線量放射線の影響に関連して大いに注目される。

特に、カーネーション・キクでのイオンビーム育種実用化と突然変異誘発機構の解明という成果は、21 世紀の社会的ニーズである環境保全植物・環境浄化植物資源創生、環境ストレス耐性植物資源創生に直結するものである。また、カイコ卵の細胞性胞胚期における組織原基分布図（発生運命予定地図）の作成は学術的に有意義な成果である。検出手法な

どは新しい産業創出の面で波及効果が期待できる。放射線抵抗性細菌のPprAプロテインの実用化を進めるなど、産業への展開につなげる戦略を実行していくことを期待している。さらに、食品照射は、社会的に重要で、積極的な開発計画を期待したい。

そのためにも、イオンビームの生物影響、DNA分子への影響などの基礎知見を新育種技術の応用加速に貢献できる形にまとめ、ルーチンに利用できる体系とされたい。民間との共同研究は、今後にも同様な事業を期待したい。

#### (e) 将来への研究開発の展開（評価点 4.3）

第15回放射線利用研究報告会でも、イオンビームによるガン治療の成果・花の新品種育成は聴講者の大きな関心をよんでおり、医学・生物学、環境応用は、原子力を人と自然の調和に活用する研究機関としての原研高崎研究所の意義を人々に実感してもらうのに効果的である。この分野は高崎研究所のイオンビーム利用研究の大きな特徴である。余りに応用にはしることなく基礎データの収集も含めたドッシリとした研究の展開を希望する。

特に、カーネーションの実用化により、今後の植物育種分野の発展が予想されるが、主要成果として今後とも品種登録を含めていく必要がある。また、より意図的な突然変異誘導、品種改良につなげていくことが大切である。データベース化による知見の集積・整理と、だれもが利用できるシステムつくりにより、新たな材料、品種での育種が飛躍的にスピードアップできると期待される。

さらに、ポジトロンイメージングでの環境応答研究は劣化環境での食料生産資源創生につながるもので、この方向に集中させる展開も評価できる。また、病気治療にも放射線利用は大きな役割りをはたしており、より高精度かつ正常細胞への損傷の少ない方法が望まれているので、その方向へ、さらに展開されることを期待する。

なお、この分野では関連したデータは膨大なものと思われるが、それらのデータの関連性を有効にデータベース上で利用できるようなシステムを構築するとともに、研究活動の過程で得られた将来の研究開発の芽を整理し、残しておくことを希望する。

#### 3.3.2.2 その他の所見

上記以外の所感、問題点、提言等、各委員の所見を以下に列記する。

○多彩な植物のイオンビーム育種技術の開発：イオンビーム突然変異機構解明による新品種開発は「先端技術大賞」を受賞し、すばらしい。花卉や園芸植物などの商品の普及を通じて、人々に豊かな時間を提供するイオンの力が実感され、原子力がより身近で必須のものと実感されるまでに至ることを期待している。

○新産業創出の分野として、バイオでのカイコ利用あるいは植物資源DNA利用面からの医薬品開発、医療福祉関連製品開発など、今後の生活の質の向上に貢献する医療・福祉分野での寄与が期待される（放医研とは異なるカテゴリーでの寄与）。

- ポジトロンイメージングによる環境応答研究の成果をストレス耐性植物資源の創生につなげていく内外連携、またシングルイオン細胞照射技術やマイクロサージェリー技術をピンポイントでの意図的な突然変異誘発技術の開発につなげていく連携は、生物資源利用3領域での総合化テーマとして、資源創生での新たな飛躍を生むポテンシャルを持つ。
- 食品への放射線応用、特に遺伝子突然変異の利用は、社会的に相当抵抗があると思われる所以、ゆっくり安全性評価などを進めていただき、遺伝子材料解析や病気診断、治療への応用を是非進めていただきたい。また、合わせて、技術面から見た安全性の一般への啓蒙へ向けた努力もお願いしたい。

### 3.4 放射線高度利用センターの研究開発

#### 3.4.1 研究開発課題の概要

イオン照射研究施設 (TIARA) の管理・運営並びに電子線・ガンマ線照射施設の円滑かつ効率的な運転管理を行うとともに、放射線利用研究拠点施設の機能を統括し、放射線利用研究を推進する業務を行う。またマイクロビーム技術開発並びにイオン源、加速器、線量計測等の技術開発を行い、ビーム利用の技術開発と施設機能の高度化を図る。

##### 3.4.1.1 主要課題領域の構成、研究開発目標及び成果

###### [主要課題領域の構成及び目標]

###### (1) 放射線照射施設の管理・運営（主要課題領域 1）（研究支援業務）

4 基のイオン加速器から成るイオン照射研究施設 (TIARA) の管理・運営及びイオン加速器の安定かつ効率的な運転管理、並びに電子線・ガンマ線照射施設の円滑かつ効率的な運転管理を行うとともに、放射線利用研究拠点施設の機能を統括し、放射線利用研究を推進する業務を行う。

###### (2) イオンビーム技術の開発（主要課題領域 2）

イオンビーム利用研究のニーズを捉えたマイクロビーム技術開発並びにイオン源、加速器、線量計測等の技術開発を行い、ビーム利用の技術開発と施設機能の高度化を図ることによって、先端的なバイオ・材料分野におけるイオンビーム利用の促進を図る。

###### [主要課題領域の成果]

(1) 放射線照射施設の管理・運営（主要課題領域 1）（研究支援業務）
1) イオン照射研究施設の管理・運営（利用計画課）
当初の達成目標【事業の目標】
・イオン照射研究施設の管理・運営業務では、TIARA の円滑かつ効率的な利用・運営を行い、放射線高度利用研究を支援するとともに、イオンビーム利用の開かれた拠点施設としての機能向上を図る。
研究成果の内容【業績、技術開発等】
・平成 11 年度、原研施設利用協議会の発足に伴い、従来のイオン照射研究施設利用委員会が TIARA 専門部会に、施設利用計画専門部会が課題審査作業部会に変更された。これに伴い、課題審査作業部会では、公募した実験課題の審査を行い、専門部会では、審査結果を基にした課題の採択とビームタイムの配分等を中心に審議するなど審議項目の重点化を図るとともに、その結果に基づいて、施設側でビームタイムの割付を行う等施設運営上の改善を行った。
・平成 11 年度から、TIARA 実験者窓口業務の開始、電子メール利用による申し込み等、施設利用事務手続きの合理化及び円滑化を図った。
・平成 13 年度実験課題の審査方法について、平成 10~12 年度の 3 年間継続してきた課題審査方法の評価上の問題点等を明らかにし、評価項目と評価の着眼点等の見直しにより評価方法を改訂し、実施課題の重点化をより一層進めた。また、実験課題の申込を電子メールで受け付ける等の施設利用事務手続きの合理化を図った。
・平成 12 年度に、TIARA 利用研究 10 年間の成果を「放射線高度利用研究の展開 10 年の成果(1991 ~2000)」として 3 部構成の資料としてまとめた。10 年間の施設利用の成果として、学術論文：481 件、国際会議報文：254 件、学位論文：博士 15 件、修士 55 件、特許申請：24 件、新聞発表：

17件、学会等からの受賞：8件等の数値データをまとめた。

2) イオン加速器系の運転管理 (イオン加速器管理課)
当初の達成目標 [事業の目標]
・AVF サイクロトロン及び3台の静電加速器の運転・維持管理及びそれらに係る技術開発並びに利用者への技術的支援
研究成果の内容 [業績、技術開発等]
[サイクロトロンの運転管理]
・年間運転計画に従って週単位の24時間連続運転を職員6名(兼務3名)、委託運転員8名で実施し、定常的に年間約3200時間運転を維持するとともに、カクテルビームを始めとする多様なビームを研究利用に提供した。
・宇宙用半導体の耐放射線性試験や高分子多孔膜開発の研究グループから要望されていた金属イオンの利用に対応するため、平成10年度に高性能ECRイオン源(金属イオン源)を増設し、翌11年度より鉄イオンの提供を開始した。
・電磁石鉄心の温度上昇に起因して発生するビーム強度の不安定現象を抑えるため、11年度に電磁石コイルと鉄心の間に水冷バッフルを設置する等の改良工事を実施し、長時間にわたるビーム強度の安定化を達成した。
・装置の高経年化及び安全対策として、10年度に制御計算機の更新、11年度にロータリーシャッターの更新を行った。ロータリーシャッターについては、耐久性と真空シール性に工夫をこらし、その成果に対して文部科学大臣賞を受賞した。
・施設の機能向上のため、ビームエネルギー幅を約一桁小さくするためのフラットトップ加速方式のための改造工事を13年度に、また、同年にフルストリップの炭素イオン、金属イオンを含むM/Q=4のカクテルビーム等の研究利用への提供を開始した。
[静電加速器の運転管理]
・タンデム加速器、シングルエンド加速器及びイオン注入装置は、年間運転計画に従って日単位で23時までの運転を職員6名(兼務4名)、委託運転員6名で実施し、それぞれ1850-2400時間運転を維持するとともに、トリプルビーム照射等の複合照射利用やマイクロビームを利用したマイクロPIXE分析など多様な研究利用にビームを提供した。
・3台の加速器について、経年的に性能が劣化した加速管を10,000時間運転を目安に順次交換し、これを完了した。
・タンデム加速器の重イオン源増設に必要な性能を確保し、維持管理を容易にするため、12年度に制御計算機の更新を行った。
・タンデム加速器に設置された2台のイオン源の内、使用頻度の高い(90%以上)重イオン源を新たに1台増設して3イオン源体制とした。これにより、保守や準備時間の確保が可能となり、クラスター等従来のイオン源で発生し難いビーム利用の促進や運転の効率化に貢献した。
・タンデム加速器によるクラスターイオン、イオン注入装置に搭載したミニECRイオン源から多価イオン、同じくSF <sub>6</sub> プラズマ法による高融点金属イオンの安定な供給体制を確立し、利用者へのビーム提供を定常化した。創意工夫をこらして開発したSF <sub>6</sub> プラズマ法に対しては、科学技術庁長官賞を受賞した。

3) 照射施設の運転管理 (照射施設管理課)
当初の達成目標 [事業の目標]
・ガンマ線照射施設及び電子加速器照射施設を円滑に運転し、所内外の利用に供する。ポジトロン利用研究施設の建設・整備として、施設の概念設計を実施し、施設を立上げる。

## 研究成果の内容〔業績、技術開発等〕

- ・毎年、約 12 万キューリー（ペンシル型線源 12 本分相当）のコバルト 60 線源の購入と計画的な線源組立・配置により、所内外の利用に効果的に供するとともに、円滑で効率的な施設運営を行った。
- ・合理的な施設運営を行うため、利用計画の調査・調整と必要に応じた施設の廃止計画（RI 工学試験棟の廃止（平成 10 年度）、東海研コバルト照射室の廃止（平成 13 年））を立案・実施した。
- ・施設の安全対策として、購入後 20 年以上経過し、保管状態となっている使用済み線源の計画的な処分（RI 協会引き取り）を実施（4 年間で 240 本）するとともに、施設の老朽化に計画的に対応し安全確保を図った。（食品照射棟制御系更新（平成 10 年）、コバルト第 2 棟の線源駆動系、遮蔽扉等の改良工事（平成 12 年）、1 号加速器電源系の更新（平成 11 年）、1 号加速器制御系の更新（平成 13 年））
- ・ポジトロン利用研究施設の建設・整備については概念設計まで行ったが、施設の立ち上げには至っていない。
- ・平成 10 年度から 13 年度までの 4 年間の施設利用に関して、学術論文（レフェリー付き）：119 件、学術論文（レフェリー無し）：81 件、特許申請：39 件の研究成果がえられた。

## 4) 放射線高度利用研究推進業務 (放射線照射業務課)

## 当初の達成目標〔事業の目標〕

- ・放射線高度利用研究委員会（現放射線フロンティア委員会）等の活動及び外部研究機関との協力を通じて、放射線高度利用研究開発を推進する。
- ・放射線高度利用研究委員会（現放射線フロンティア委員会）、同専門部会の企画、開催及び調整業務を行う。
- ・TIARA 研究発表会の企画、開催及び調整業務を行う。

## 研究成果の内容〔業績、技術開発等〕

- ・平成 11 年 3 月 31 日に、放射線高度利用研究委員会（昭和 60 年設立）と放射線照射利用研究委員会（平成 2 年設立）を統合し、各種イオンや電子線・ガンマ線を用いた研究開発及び研究計画全体を総合的に議論するための放射線フロンティア研究委員会を設立した。これに伴い、各専門部会を統廃合し、宇宙用半導体専門部会、耐放射線性有機材料専門部会、海水中有用金属捕集技術専門部会及びビーム利用将来計画専門部会の 4 つの専門部会を設置して、重点分野について集中的に審議を行うこととした。さらに、科学技術庁からの受託により平成 11 年度に放射線利用経済評価専門部会を、また、イオンビーム育種技術を推進するため 12 年度にイオンビーム育種専門部会を新設した。これら専門部会の内 3 年間活動した専門部会については、13 年度に活動成果をまとめた。
- ・平成 10 年度から 13 年度まで、TIARA 研究発表会を年 1 回開催した。特に 13 年度の第 10 回目は、記念特別講演とともに各分野の TIARA における 10 年間の研究成果を総括する基調講演を行い、新たな研究の方向性を探る契機とした。また、TIARA 年報（英文）を年 1 回発行し成果の普及に努めた。
- ・「核マイクロプローブ技術と応用に関する国際会議」は、1987 年の英国オックスフォードにおける第 1 回から各国参加主要機関の持回り主催で開催されてきたが、第 8 回目を原研主催で 14 年 9 月に高崎において開催することとなり、このための国内組織委員会を設立するとともに、予算的な調整に加えて高崎市の後援等 40 以上の所外関係機関の協力を得る総括調整を行った。
- ・原研・大学プロジェクト共同研究において放射線高度利用研究プロジェクト専門部会を年 2 回開催するとともに、第 3 期の研究成果報告書を発行した。

## (2) イオンビーム技術の開発（主要課題領域 2）(ビーム技術開発室)

## a) マイクロビーム技術

## 当初の達成目標〔事業の目標〕

- ・サイクロトロンに設置したコリメーション方式の高エネルギー重イオンマイクロビーム装置で、シングルイオンヒット技術及び細胞試料自動照準技術を開発する。新たにレンズ集束方式の高エネルギー重イオンマイクロビーム形成技術の開発に着手する。
- ・大気中にビームを取り出す方式のマイクロPIXE（粒子誘起X線放出）カメラを開発し、微小領域での元素分布測定を実現する。
- ・100keV のガスイオンで、ビーム径  $0.1\mu\text{m}$  以下のサブマイクロビームの生成が可能な高輝度イオン源の可能性を検討する。

## 研究成果の内容〔業績、技術開発等〕

- ・コリメーション方式のマイクロビーム形成装置において大気中の細胞を標的試料とする数百 MeV 重イオンの自動照準シングルイオンヒット技術を世界に先駆けて実現するとともに、四重極レンズを用いたビーム集束方式のマイクロビーム形成装置の設計・製作を行い、ビーム径  $1\mu\text{m}$  を目指したビーム調整に着手した(H13)。
- ・マイクロPIXE 分析技術では、大気中において  $1\mu\text{m}$  の空間分解能で元素の2次元分布測定技術(PIXE カメラ)を開発し、生物細胞内の元素分布の測定に成功した(H11)。
- ・サブミクロンビーム形成では、100keV 水素イオンを用いビーム径  $0.16\mu\text{m}$  を達成した(H13)。

## b) イオン源・加速器技術

## 当初の達成目標〔事業の目標〕

- ・サイクロトロンによる加速重イオンの高エネルギー化を目的に、多価重イオン（フルストリップイオン）生成を可能にするイオン源技術を開発し、金属イオンを含む多種多価イオンのサイクロトロンでの加速を可能にする。
- ・クラスターイオンの生成技術を開発し、keV～MeV 領域において nA 以上の強度のフラー・レンを含めたクラスターイオンを加速し、材料開発研究等に資する。
- ・放射線高度利用研究の新たな展開として、偏極イオンや RI ビーム加速の可能性を検討する。（ニーズの変化から本項目の検討優先順位を下げた。）

## 【期間の途中から開始した事項】

- ・第2期科学技術基本計画、原子力長期計画への対応、及び TIARA におけるイオンビーム育種など研究の進展からの重イオンの高エネルギー化への強いニーズに応えるため、次期加速器整備計画として GeV 級重イオン加速に関する検討を行う。
- ・サイクロトロンのビーム不安定の原因を究明し、高安定化を図るとともに、数百 MeV 級重イオンのマイクロビームを形成するために必要なビームエネルギー幅最小化等ビーム高品位化技術の開発に着手する。

## 研究成果の内容〔業績、技術開発等〕

- ・多価重イオンを生成するため、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源を開発し、He からアルゴンまでのフルストリップイオンと鉄等の金属イオンの加速を実現するとともに、核子当たりの最大エネルギー 27MeV (6 価の炭素イオンで 320MeV) を達成した(H11)。
- ・クラスターイオン生成・加速では、タンデム加速器により C<sub>8</sub> 1.5 nA、イオン注入装置により C<sub>60</sub> 100 nA 等の加速に成功した(H13)。
- ・サイクロトロンのビーム変動原因が鉄心温度上昇に伴う磁場変動であることを明らかにし、鉄心温度の定温化技術の開発によりビームの安定化に成功した。従来磁場の精密測定が困難であった大きな勾配磁場中でも測定可能な改良型 NMR 磁場測定装置を開発し、 $10^{-6}$  台の高精度磁場測定を実現した(H12)。
- ・サイクロトロンで加速したビームを直径  $1\mu\text{m}$  のマイクロビーム形成に必要なビームエネルギー幅  $\Delta E/E \leq 2 \times 10^{-4}$  を達成するため、正弦波の加速電圧基本波に 5 倍の高調波を重畠させるフラットトップ加速技術の開発に着手した(H13)。
- ・イオンビーム育種、生体機能解析及び機能性材料開発の研究計画で要請されている加速器性能の

検討を進め、超電導 AVF サイクロトロンの基本仕様検討を行い、陽子 290MeV と核子当たり 150MeV の炭素イオンの加速を両立する世界で初めての超電導電磁石設計の見通しを得た。	
c) 線量計測技術	
当初の達成目標 [事業の目標]	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料・生物試料などのイオン照射効果の評価・比較・予測等の共通の基盤となる線量計測技術の開発を行う。</li> <li>・線量測定に基づく照射製品の品質管理方法の規制導入に伴ない、国内及び国際間における線量標準化を進める。</li> </ul>	
研究成果の内容 [業績、技術開発等]	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・フィルム線量計のイオンビーム応答性を明らかにし、±5%以内の精度で吸収線量評価を可能にした(H11)。</li> <li>・国内ガンマ線量トレーサビリティシステムの整備を目的に、アラニン線量計の線量測定に関わる不確かさを評価し、「アラニン線量計測装置」の日本工業規格を制定させた(H12)。</li> <li>・工業加工レベル(kGy 領域)の校正ガンマ線施設を構築し、線量標準供給システムに関わる技術を確立した(H12)。</li> </ul>	
d) 加速器遮蔽基礎データ整備	
当初の達成目標 [事業の目標]	
・中性子科学研究などに必要な高エネルギー加速器施設の設計精度を高めるため、数 10MeV 級準単色中性子の遮蔽基礎データの整備を行う。	
研究成果の内容 [業績、技術開発等]	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・加速器施設設計に必要な中性子及び荷電粒子の核反応による二次粒子生成データ、大強度陽子加速器施設の運転管理に必要な線量評価用基礎データを取得するとともに、当該施設に適用可能な中性子モニター開発の見通しを得た(原研・大学プロジェクト共同研究)。</li> </ul>	

### 3.4.1.2 研究資源の実績

	予 算(百万円)						人員(人・年)
	研究経費	運転維持費	研究設備費	その他	特別会計等	合計	
(1) 放射線照射施設の管理・運営 (主要課題領域 1)							
小計	157	3,092	400+419*	179		3,829+419*	122+20**
(2) イオンビーム技術の開発 (主要課題領域 2)							
小計	75	35	+50*			110+50*	36
総計	232	3,127	400+469*	179		3,939+469*	158+20**

\* +は補正

\*\* 特別研究生又は専門研究員

### 3.4.1.3 人材育成

- ・開かれた放射線・RI 施設としての管理・運営及び運転管理には、各々専門的な技術や知識と施設利用者等との密接な連携が必要である。このため、国際原子力総合技術センター主催の研修を始め、各種研修に参加させ、専門的な知識の習得や資格の取得を奨励する等積極的に人材育成を行っている。合わせて、加速器科学研究会、タンデム研究会、その他関連する研究会への積極的な参加を奨励して、各担当者の士気高揚の場とともに、担当業務の当該分野での位置付けを学問的に把握できる機会としている。
- ・先端的研究のニーズを捉えた先導的な技術開発やユーザーのニーズに応える技術開発の

実施は、所内外のビーム利用研究グループとの密接な協力の下に行われ、特に、原研・大学プロジェクト共同研究で受け入れた特別研究生は、3年間の研究活動で「博士号」を取得させるに至った。また、この研究評価期間中、原研職員2名の「博士」が誕生する等当初目標を達成したと評価している。

- 平成10年度の研究評価委員会で指摘された職員の老齢化や人員面での不足については、関連部署との連携により職員の計画的な補充を行いつつあるが、技術の継承という観点からも今後も留意すべき課題であると考え、計画的な補充を行う。

#### 3.4.1.4 所内外との研究協力

- 放射線高度利用センターの業務は、TIARAを中心とした放射線照射施設を有効且つ効果的に活用し、放射線利用研究推進とその実用化に貢献することである。従って、部内の運営はもとより、所内外からの協力を得ることが不可欠である。このため、原研施設利用協議会 TIARA 専門部会並びに放射線フロンティア研究委員会活動を有効且つ効果的に実施するとともに、材料開発部、環境・資源利用研究部をはじめ、所内関連部門との連携を強化した。大学を含む国内諸機関との連携については、共同研究、研究委員会活動等により密接に行った。国際的には、2002年9月高崎市において開催した「第8回核マイクロプローブ技術と応用の国際会議」の実施母体として、所内外からの専門家から成る組織委員会活動を通じて、会議を成功裡に開催し、原研の成果の普及に貢献した。

#### 3.4.1.5 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果

- イオン照射研究施設 (TIARA) は、第7回原子力開発利用長期計画において謳われた、「原子力利用に新しい途を拓き、幅広い科学技術分野での貢献が期待される新しいビーム発生・利用技術」の研究開発を推進し、「高度に制御された陽子線及び重粒子線」を利用する開かれた研究施設として建設・整備されたものである。研究対象は、科学技術会議第11号、12号答申に盛り込まれた物質・材料、エネルギー、情報・電子、ライフサイエンス4分野での高度先端技術に関わる研究であり、産学官各界の有識者から構成された「放射線高度利用研究委員会」において、TIARA で実施すべき研究基本計画が策定された。材料・バイオ研究専用の加速器施設として国際的にもユニークな TIARA における10年を超える利用経験と研究成果は、「高度に制御された陽子線及び重粒子線」が、材料・バイオ技術等の基礎的・先端的な研究の推進にとって有用であることを示すことに加えて、新たな研究領域を開拓した点において、科学技術分野の進展に大きく貢献したと高く評価できる。
- 放射線利用は、国第2回原子力長期利用計画においてエネルギー利用と同じく重要であると謳われて以来、研究開発が進められ、実用化研究とともに科学技術基本計画において謳われている環境、バイオ、ナノテク等の先端研究分野においても貢献する範囲は広く、個々の研究成果の達成を通して当該分野への寄与が大きいと評価している。具体的には、高エネルギー重イオンの自動照準シングルイオンヒット技術の開発により、生体機能解明などバイオ技術分野の研究推進に大きく寄与した。また、大気マイクロ PIXE

分析技術の開発により、細胞レベルでの元素分布測定を実現し、細胞の代謝機能解明など生物・医学分野における研究開発への新たな利用の途を拓いた。

- ・カクテルビーム加速技術の開発により、宇宙分野で使用される半導体素子の地上試験の効率を大幅に改善することを可能にするとともに、宇宙開発事業団が実施する宇宙用半導体の耐放射線性試験に関する特定研究に対して、サイクロトロンの休日運転を実施して、国の宇宙開発プロジェクトの円滑な推進に貢献した。
- ・高エネルギー重イオンのシングルイオンヒット技術は、生物細胞への照射効果など生体機能解明をはじめとしたバイオ技術分野の研究推進に寄与した。大気マイクロ PIXE 分析技術は、生物・医学分野への利用の道が拓け、多くの医学系研究者の利用が増大し、例えば放射線による細胞のアポトーシス機構の解明や抗がん剤の効能を調べる研究などへ展開された。カクテルビーム加速技術開発によってビームエネルギーを最大化し、炭素イオンなど植物育種等により適したエネルギーの照射実験を可能にした。
- ・サイクロトロンにおけるビームの安定化と磁場の高安定化を達成したことにより、ビーム調整時間の大幅短縮と運転効率の向上を実現した。本成果は、国立がんセンター東病院や東北大学のサイクロトロンにも適用され、がん治療や原子核物理研究などの信頼性向上に大きく貢献し、高い評価を得た。
- ・「アラニン線量計測装置」の日本工業規格を制定させることにより、放射線加工分野における国内トレーサビリティシステム導入に向けて大きく貢献した。
- ・イオン照射研究施設の開かれた拠点的研究施設としての公募課題及び共同利用（有料）の利用運営実績が認められ、新設された大型研究施設（若狭湾エネルギー研究センター、原研関西研究所）へ施設運営の情報を提供した。

### 3.4.2 評価結果

#### 3.4.2.1 項目別評価

##### 1) 放射線照射施設の管理・運営（主要課題領域1）

###### (a) 研究支援業務の実績・成果（評価点 4.8 (5点満点に対する各委員の平均点。以下同じ)）

原子・分子レベルで物質の構造を変えることにより生活の利便性、豊かさ、環境と調和した新産業の創出を実現する基盤技術として、各種照射技術の開発は大変重要である。

照射性能の向上を目指したサイクロトロンの安定化、植物育種を容易にする大面積均一照射・深度の向上、細胞加工・細胞機能解明などのためのマイクロビーム、シングルイオン照射、微量元素分布測定技術の向上など、いずれの成果も高く評価できる。

TIARA は、稼動当初より開かれた施設として運営されてきており、共同利用を進めて、成果を挙げている。このシステムは原研の中でも類を見ないもので、高い評価を得ている。過去 10 年間の研究成果をまとめて公表するなど、外部に対する説明責任を果たす姿勢も評価できる。イオンビーム装置・機器の運転は、年々順調となり、不具合が確実に減少してきたのは、関係者の努力のたまものと評価できる。また、ビームタイムを確保し、かつ、カクテルビーム照射や新イオン源を増設するなど、利用者への便宜をはかつておらず、大きな貢献をしていると評価する。

このことは、ソフト面では、研究成果が上がるよう課題採択等の工夫をたゆまず進めてきたこと、ハード面では、研究者からの要請に答えるべく、新ビームや新イオン源開発に積極的に取り組んだことによるもので、いずれも高く評価できる。運営の効率化へ向けた改善点も評価できる。電子メールによる課題受付など、研究課題申請等の事務手続きは、電子化、合理化が順調に進んでいる。特に外部ユーザーにとって便利で対応しやすいシステムを実現した。今後とも、実績を上げている支援、開発を継続して進め、産業に結びつけていくことを期待する。

###### (b) 研究支援業務の進め方の妥当性（評価点 4.7）

外部への開かれた施設としての運用は適切に行われた。また共同研究機関との連携やその組織も妥当である。イオン加速器系の運転管理に関わる人員は、他に比して少ないよう見えるが、にもかかわらず頑張ってやっている観がある。

「放射線高度利用研究の展開 10 年の成果」3 部作は、原研高崎研究所の成果 PR、所内外研究開発者への開発のヒント提供、新たな展開の探索に役立つもので、重要な作業であり、委員会等の改変も、合理化への絶え間ない意識的努力の表れと受け取れる。マシンタイムは逼迫しているが、広く原研高崎研究所をアピールし、所外協力・連携の進展による優良研究課題のさらなる発掘、実用化の進展誘導に役立てて欲しい。

今後は、施設の老朽化への対応が重要な課題となろう。ガンマ線・電子線照射装置も、国内で重要な役割を持っており、老朽化設備の更新はただ機械的に行うのではなく、今後のニーズをよく把握してメリハリをもたせ、国内での照射を必要とする研究に提供する事が望まれる。

なお、加速器施設の運転管理において、故障等のトラブルにより運転できなかった時間

は重要なデータである。ビーム切り替えに伴う時間を含めてデータとして整理し、残しておくべきである。

#### (c) 人材育成及び士気確保の措置（評価点 4.1）

数少ない陣容で、サイクロトロンの安定化、大面積均一照射・深度の向上、マイクロビーム、シングルイオン照射、微量元素分布測定技術の向上など、実績を上げてきたのは、人材の育成・士気確保が機能した結果であろう。全国の利用者に対する、研究、教育への貢献は多大なものがある。

装置の絶えざる保守、管理と言う業務をいかに魅力あるものとして人材を育成するかについて、さらなる検討の余地はあるように思う。設備技術の継承は研究と比べて、ともすると軽視されがちだが、今後は極めて重要となってくる。是非、組織的なシナリオを作つて、専門家の育成に積極的に取り組むとともに、職員の計画的な補充を進め、次期計画の体制作りに備えて欲しい。

担当者の「士気高揚」のために、研修などによる育成は重要な課題である。今後とも「各種研修」、「研究会」への参加を積極的に位置付けることが望まれる。また、所内外表彰等による士気確保をいっそう進める一方で、長期にわたる地味な研究についても評価する空気を保たれたい（その判断の目安は学術誌上での継続的な成果公表である）。

#### (d) 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果（評価点 4.5）

原研高崎研究所が所持している設備は、よく利用されており、共同研究などを通じ、マイクロビーム関連の技術、大気 PIXE 等、複数の分野に波及効果をもたらす成果を得ており、十分に我が国の科学技術の進展に寄与している。研究者の要求にも充分寄与しており、開かれた研究所としての、多種多様なテーマに対応した放射線創製・利用法開発・ビームの安定化を通じて、産官学すべての面で人材育成に大きな貢献をしている。限られたビームタイムのなかで課題の重点化、萌芽的研究発掘と、施設の効率的運営とを並立させる努力姿勢は高く評価できる。

国内の放射線源の老朽化、劣化が進む中で、放射線科学の基本ツールとしての放射線源を維持提供することは、今後益々重要になっていくと思われる。せっかくの運転管理効率化が無駄にならないよう、施設設備の計画的更新、管理システム運営の合理化の更なる推進が必要である（常に効率化を図っていくことが必要）。ナノテクノロジーなどの材料分野、植物資源創生・バイオ産業展開などの生物応用分野とともに、GeV 級加速器は大変有効である。

## 2) イオンビーム技術の開発（主要課題領域 2）

#### (a) 研究開発課題の目的達成度（評価点 4.6）

イオンビーム技術の開発は、当初の目的をほぼ達成しており、いずれも達成度は高く、ユーザーの要求にも十分応えていると評価する。マイクロビーム形成技術やシングルヒット技術の開発、大気中にビームを取り出すマイクロ PIXE 技術の開発など、貴重な成果と評

価される。東北大との共同開発による「大気マイクロ PIXE 分析技術」は医学、生物学に応用する具体的方策を見つけ出して、実用化につなげて欲しい。

ただ、マイクロビームを発生する装置は照射対象にくらべ大きすぎるので、より小型（できれば卓上型）のビーム装置の開発が今後の課題と思われる。半導体の微細化は  $0.1 \mu\text{m}$  まで進んでおり、ビーム径の微細化 ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ) が必要になる。

#### (b) 研究開発実施経過の妥当性（評価点 4.3）

研究開発の展開については、従来から国際的な動向を良く把握したうえで方向付けがなされており、原研内外との協力・連携も積極的に実施され、研究資源の活用とも妥当性は評価できる。ただ、外部との協力・連携は重要ではあるが、原研オリジナルの研究開発がいっそう必要な時期に来ているとも思われる。

サイクロトロンの運転管理では状況に応じて、高精度磁場、フラットトップ加速など、柔軟に対応している。状況の変化から各研究項目の優先度の見直しや、新規計画への対応などの追加を実施しており、これらは妥当である。

線量標準化研究は地味であるが、照射産業にとって重要である。電子ビームの線量標準化のためのデータ整備を更に進めて欲しい。

ただ、中性子の遮蔽実験は、加速器施設にとって非常に重要な実証的研究ではあるが、アカデミックな面白さに欠ける嫌いがある。

#### (c) 人材育成（評価点 3.8）

全国の利用者に対する、研究、教育への貢献は多大なものがあるが、職員や特別研究生の育成はまずまずの評価ができる状態である。

職員の人材育成は、予算との関係もあり、補充その他、苦労されているのも理解できるが、もっと積極的に取り組むべきである。原研職員の学位取得は、重要な事があるので引き続き取得を奨励する事が望まれる。

研究面では色々なアイディアを持った人の配置など、常に人材の新陳代謝を図ることが肝要であり、テーマ、分野に応じた人事交流による人材育成が今後さらに必要である。外部との人事交流等を更に進め、今後の人材確保に留意して欲しい。

#### (d) 研究開発の成果の普及・波及効果（評価点 4.3）

新しいビーム技術の開発と利用において、着実な成果を積み重ねており、そこからのナノテクノロジー分野、生物応用分野への波及効果は大きい。また、放射線量トレーサビリティーの重要性は高く、さらなる貢献を期待したい。

新しいビーム利用研究に、新しいビーム技術の開発は極めて重要である。新しい課題を持ち続けて、開発を継続していくことが望まれる。今後の展開では新施設の有用性を広く確かめた上で計画の策定をお願いしたい。

さらに、成果の公開・発表に関しては、概ね納得できる水準であるが、研究・開発がより高度化されるためにも、学術誌への投稿をもっと多くする必要がある。

### (e) 将来への研究開発の展開（評価点 3.8）

これまでのビーム技術開発は諸分野の先端的研究開発を支えてきた。実績を積んだ TIARA のオリジナリティが問われる時期であるが、野心的な研究・開発の試みを期待したい。

ナノテクノロジーなどの材料分野、植物資源創生、バイオ産業展開などの生物応用分野とともに、GeV 級加速器は大変有効である。これまでの蓄積を活かし発展させる形での GeV 級加速器の開発を期待する。

大型設備投資には技術シーズをよく考えた綿密な計画の作成を期待したい。加えて、より小型、低価格のビーム装置の開発が出来ると、放射線利用技術がさらに拡がると思われる所以、是非考慮願いたい。

なお、これから効率的な研究展開のためには、技術的な課題として残っている事例と、これらの課題の分析結果と取り組みを、貴重な資産として残して、生かす事が重要である。

#### 3.4.2.2 その他の所見

上記以外の所感、問題点、提言等、各委員の所見を以下に列記する。

- 二重、三重ビーム照射は TIARA の大きなセールスポイントの一つであり、最近多重ビーム照射のマシンタイムも相当確保されており、この面での特徴ある成果を期待したい。
- KEK との共管で進められる大強度陽子加速器プログラムへの貢献と連携を今後考えていくことが重要である。
- 開かれた施設としての管理・運営は適切であり、評価できる。同じように、イオンビーム技術開発も開かれた技術として応用面を社会にアピールし、基礎知見の獲得のみならず、応用開発をさらに進めて欲しい。
- ・技術は先端であればあるほど直ぐに陳腐化するので、世界の競争機関の動向を適確につかんでおく必要がある。
  - ・特に、設備規模の大きい施設に関しては、有用、かつ、ここでなくてはできない技術について、常に次を見ながら進んでいってもらいたい。
  - ・ただし、次に計画している GeV 級重イオン加速器開発など、大型設備に関しては、装置技術と研究テーマのリンクを密接にして欲しい。「装置はできたけれども有効な使い道がなかなか見つからない。」というようにならないよう、よく議論・評価をすることが重要である。

## 別表

## 放射線利用研究専門部会評価結果（評点）一覧

材料開発部の研究開発課題	(5点満点に対する各委員の平均点)	
1) 機能材料創製の研究 (主要課題領域 1)	(a) 研究開発課題の目的達成度	4.6
	(b) 研究開発実施経過の妥当性	4.3
	(c) 人材育成	3.8
	(d) 研究開発の成果の普及・波及効果	4.3
	(e) 将来への研究開発の展開	4.0
2) 放射線環境材料評価の研究 (主要課題領域 2)	(a) 研究開発課題の目的達成度	4.5
	(b) 研究開発実施経過の妥当性	4.0
	(c) 人材育成	3.5
	(d) 研究開発の成果の普及・波及効果	3.9
	(e) 将来への研究開発の展開	4.0

## 環境・資源利用研究部の研究開発課題

1) 環境保全に対する放射線利用技術の開発 (主要課題領域 1)	(a) 研究開発課題の目的達成度	4.5
	(b) 研究開発実施経過の妥当性	4.3
	(c) 人材育成	3.2
	(d) 研究開発の成果の普及・波及効果	4.2
	(e) 将来への研究開発の展開	4.0
2) 生物資源の利用技術に関する研究 (主要課題領域 2)	(a) 研究開発課題の目的達成度	4.8
	(b) 研究開発実施経過の妥当性	4.3
	(c) 人材育成	3.8
	(d) 研究開発の成果の普及・波及効果	4.6
	(e) 将来への研究開発の展開	4.3

## 放射線高度利用センターの研究開発課題

1) 放射線照射施設の管理・運営 (主要課題領域 1) (研究支援業務)	(a) 研究支援業務の実績・成果	4.8
	(b) 研究支援業務の進め方の妥当性	4.7
	(c) 人材育成及び士気確保の措置	4.1
	(d) 科学技術の進展への寄与、成果の波及効果	4.5
2) イオンビーム技術の開発 (主要課題領域 2)	(a) 研究開発課題の目的達成度	4.6
	(b) 研究開発実施経過の妥当性	4.3
	(c) 人材育成	3.8
	(d) 研究開発の成果の普及・波及効果	4.3
	(e) 将来への研究開発の展開	3.8

## 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
光强度	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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	クーロン	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	ウェーバー	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	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

(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。

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	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

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

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

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

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

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

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

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

### 換 算 表

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

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

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

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J (計量法)}$$

$$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$$

$$= 4.1855 \text{ J (15°C)}$$

$$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$$

$$\text{仕事率 } 1 \text{ PS (仮馬力)}$$

$$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	

吸収線量	Gy	rad
	1	100
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	

線量当量	Sv	rem
	1	100
0.01	1	

放射線利用研究専門部会評価結果報告書（平成14年度事後評価）

