



JAEA-Evaluation

2015-009

DOI:10.11484/jaea-evaluation-2015-009

平成26年度 研究開発・評価報告書
評価課題「量子ビーム応用研究」（事前評価）

Assessment Report of Research and Development Activities in FY2014
Activity: “Quantum Beam Science Research” (In-advance Evaluation)

量子ビーム応用研究センター
Quantum Beam Science Center

原子力科学研究部門
Sector of Nuclear Science Research

September 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Evaluation

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

平成 26 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「量子ビーム応用研究」(事前評価)

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
量子ビーム応用研究センター

(2015 年 6 月 23 日 受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成 20 年 10 月 31 日内閣総理大臣決定)及びこの大綱的指針を受けて作成された「文部科学省における研究及び開発に関する評価の指針」(平成 21 年 2 月 17 日文部科学大臣決定)、ならびに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」(平成 17 年 10 月 1 日制定、平成 21 年 8 月 19 日改正)等に基づき、量子ビーム応用研究に関する事前評価を量子ビーム応用研究・評価委員会に諮問した。

これを受けて、量子ビーム応用研究・評価委員会は、本委員会によって定められた評価方法に従い、原子力機構から提出された平成 27 年 4 月から平成 34 年 3 月までの第 3 期中長期計画における量子ビーム応用研究センター(平成 26 年 4 月より、量子ビーム応用研究部門から名称変更)の運営ならびに量子ビーム応用研究の実施状況に関する説明資料の検討を行った。

本報告書は、量子ビーム応用研究・評価委員会より提出された事前評価の内容を取りまとめたものである。

本報告書は、研究開発・評価委員会(量子ビーム応用研究・評価委員会)が「国の研究開発評価に関する大綱的指針」等に基づき実施した外部評価の結果を取りまとめたものである。

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究センター(事務局)

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

Assessment Report of Research and Development Activities in FY2014
Activity: “Quantum Beam Science Research” (In-advance Evaluation)

Quantum Beam Science Center

Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 23, 2015)

Japan Atomic Energy Agency (hereafter referred to as “JAEA”) consulted an assessment committee, “Evaluation Committee of Research Activities for Quantum Beam Science” (hereafter referred to as “Committee”) for result evaluation of “Quantum Beam Science”, in accordance with “General Guideline for the Evaluation of Government Research and Development (R&D) Activities” by Cabinet Office, Government of Japan, “Guideline for Evaluation of R&D in Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology” and “Regulation on Conduct for Evaluation of R&D Activities” by JAEA.

In response to the JAEA’s request, the Committee assessed the research program of the Quantum Beam Science Center (hereafter referred to as “QuBS”) during the period from April 2015 to March 2022. The Committee evaluated the management and research activities of QuBS based on the explanatory documents and oral presentations.

Keyword: Quantum Beam Science Research

This evaluation report presents the result of third-party evaluation conducted based on the “General Guideline for the Evaluation of Government R&D Activities” by Cabinet Office, Government of Japan, etc.

目次

1. 概要	1
2. 量子ビーム応用研究・評価委員会の委員構成	2
3. 審議の経過	3
4. 評価方法	4
5. 評価結果（答申書）	6
付録（日本原子力研究開発機構作成資料）	21

Contents

1. Outline	1
2. Member list of the Evaluation Committee	2
3. Status of assessment	3
4. Procedure of assessment	4
5. Results of assessment (Committee Report)	6
Appendix (documents prepared by Japan Atomic Energy Agency)	21

This is a blank page.

1. 概要

量子ビーム応用研究・評価委員会（以下、「本委員会」という。）は、日本原子力研究開発機構（以下、「機構」という。）からの諮問に基づき、次期中長期計画（以下、「次期計画」という。）における量子ビーム応用研究に関する事前評価を行った。事前評価は、機構から提出された量子ビーム応用研究の基本方針と各ユニット等の研究計画に関する資料、並びに当該資料を用いた量子ビーム応用研究センター長と同ユニット長等による口頭発表と質疑応答を基にして実施した。

その結果、本委員会は諮問された、次期計画における量子ビーム応用研究の基本方針及び研究開発計画については、概ね適切な内容であり、着実に実施すべきと評価した。評価結果の詳細については、本文に示す通りであるが、特記すべき事項として以下の点が挙げられる。

○次期計画における量子ビーム応用研究の研究開発の基本方針については、量子ビームの優れた機能を総合的に活用する観点から研究計画を策定しているとともに、科学技術イノベーション創出に向けて最終的なアウトカムを明確にして目標を定めており、機構の強みを活かした妥当な計画である。

○機構は、我が国の量子ビーム応用研究を担う主たる組織である。次期計画においても、そのミッションの重要性に鑑み、各種量子ビームの先端性とその応用技術を発展させ、それらの複合的・横断的利用を積極的に推進すべきである。

○陽電子施設等の新規量子ビーム施設の整備や SPring-8 II を見据えたビームラインの高度化等については、我が国の研究開発における重要な共通基盤である量子ビームプラットフォームの維持・強化に資するものであり、着実に進める必要がある。一方で、こうした量子ビーム施設の安定・継続的な運転は、機構の責務であり、人的配置や維持費の確保にも努力されたい。

○J-PARC のパルス中性子と JRR-3 の定常中性子の相補利用を積極的に進め、効率的・効果的に両施設を運用するための制度整備に取り組むべきである。J-KAREN や TIARA 等については、施設供用等を通じて、外部ユーザーの利用促進を図るとともに、そのための体制整備に努めて欲しい。

○各研究計画は、全体的に妥当である。それぞれの研究ユニットが自らの強み・特長を活かした計画を立てたことは評価できる。機構改革等で、組織・体制等については不透明な部分があるが、外部機関との連携、適切な人的配置、及び研究テーマの重点化等により、次期計画期間中に目標が達成できることを期待する。

2. 量子ビーム応用研究・評価委員会の委員構成

雨宮 慶幸	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 教授
有馬 孝尚	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 教授
池田 泰久	東京工業大学 原子炉研究所 教授
金子美智代	トヨタ自動車株式会社 材料技術開発部 材料解析室 室長
佐治 英郎	京都大学 大学院 薬学研究科 教授
島田 義也	放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター 発達期被ばく影響研究プログラム プログラムリーダー
委員長 田川 精一	大阪大学 産業科学研究所 ビーム応用フロンティア研究分野長(特任教授)
多田 啓司	旭化成ケミカルズ株式会社 研究開発総部 担当部長 公益社団法人 日本化学会 フェロー
西澤 直子	石川県立大学 教授 東京大学 名誉教授
福山 秀敏	東京理科大学 総合研究機構 機構長
三木 邦夫	京都大学 大学院 理学研究科 教授
宮永 憲明	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授
山田 和芳	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 所長

(五十音順)

3. 審議の経過

(1) 第10回量子ビーム応用研究・評価委員会（事前評価）：平成26年10月21日開催

- ・事後評価及び事前評価の進め方について
- ・量子ビーム応用研究の推進方針
- ・次期中期計画における研究計画
- ・上記報告内容に対する質疑・意見交換

(2) 評価結果のとりまとめ：平成26年10月～12月

各委員による評価結果をとりまとめ、全委員の合意のもと答申書を作成した。

(3) 答申：平成26年12月12日

以上

4. 評価方法

○評価作業手順

第3期中期計画期間における同センターの運営及び同研究の実施に関する説明資料（事前評価資料）と、これを用いた同センター長及び各研究ユニット長等による説明及びその後の質疑応答をもとに、本委員会所定の事前評価対象・項目に従い、研究開発課題評価実施規程第6条（1）に規定する事前評価の観点から評価を実施した。

○評価項目

量子ビーム応用研究センターの運営及び各ユニットにおける研究計画（量子ビーム機能性分子解析技術研究、量子ビーム材料評価・構造制御技術研究、医療・バイオ応用量子ビーム技術研究、環境・産業応用量子ビーム技術研究、先進ビーム技術研究、レーザー応用技術研究、量子ビーム物性制御・解析技術研究、量子ビーム反応制御・解析技術研究）並びに高崎量子応用研究所及びレーザー共同研究所における研究計画を評価対象とした。（評価項目は以下のとおり。）

- 1.量子ビーム応用研究の推進方針について（研究開発の基本方針、組織・運営(内外との連携、研究資源配分等含む)、第3期中期計画における研究計画、量子ビーム施設の整備と運用)
- 2.（上記の各ユニットの）研究計画について（研究開発課題選定の妥当性（必要性、革新性、独自性）、方向性・目的・目標等の妥当性、研究計画の妥当性）

○事前評価：平成27年4月より平成34年3月末

*量子ビーム応用研究は、原子力科学研究所、高崎量子応用研究所、関西光科学研究所が実施する量子ビーム技術の開発・高度化研究を包含する。

以上

第 10 回量子ビーム応用研究・評価委員会 議事次第
(事前評価)

1. 期日 : 平成 26 年 10 月 21 日(火曜日)
2. 場所:航空会館 501、502 号室(東京都港区新橋1-18-1)
3. 議題 :
 - (1) 議事進行について <田中研究推進室長> 9:00- 9:05 (5分)
 - (2) 挨拶 <以下、議長:田川委員長> 9:05- 9:10 (5分)
 - (3) 量子ビーム応用研究の推進方針
<伊藤センター長:説明 15 分、質疑 5 分> 9:10- 9:30 (20分)
 - (4) 次期中期計画における研究計画-1 <各説明 15 分、または 10 分、質疑 5 分>

量子ビーム機能性分子解析技術研究	<黒木ユニット長>	9:30- 9:50 (20分)
量子ビーム材料評価・構造制御技術研究	<武田ユニット長>	9:50-10:10 (20分)
医療・バイオ応用量子ビーム技術研究	<小林ユニット長>	10:10-10:30 (20分)
環境・産業応用量子ビーム技術研究	<前川ユニット長>	10:30-10:50 (20分)
荷電粒子・RI 利用技術開発	<小嶋部長>	10:50-11:05 (15分)
先進ビーム技術研究	<近藤ユニット長>	11:05-11:25 (20分)
レーザー応用技術研究	<杉山ユニット長>	11:25-11:45 (20分)
原子力・産業応用レーザー技術開発	<大道所長>	11:45-12:00 (15分)
 - (5) 昼食懇談 12:00-13:00 (60分)
 - (6) 次期中期計画における研究計画-2 <各説明 15 分、質疑 5 分>

量子ビーム物性制御・解析技術研究	<坂井ユニット長>	13:00-13:20 (20分)
量子ビーム反応制御・解析技術研究	<矢板ユニット長>	13:20-13:40 (20分)
 - (7) 質疑応答(全体) 13:40-14:10 (30分)
 - (8) 委員自由討論(closed) 14:10-14:40 (30分)
 - (9) 委員長講評 14:40-14:50 (10分)
 - (10) その他(事務連絡等) 14:50-14:55 (5分)

以上

5. 評価結果（答申書）

平成 26 年 12 月 12 日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
理事長 松浦 祥次郎 殿

量子ビーム応用研究・評価委員会
委員長 田川 精一

研究開発課題の事後・事前評価について（答申）

平成 26 年 7 月 1 日付け 26 原機（量）014 にて貴職より諮問のあった以下のことについて、別紙のとおり答申します。

記

【諮問事項】

- ・「量子ビーム応用研究」に関する事後評価
- ・「量子ビーム応用研究」に関する事前評価

以 上

事前評価

本委員会は、所定の評価方法に基づき、機構における「量子ビーム応用研究」に関する事前評価を行い、その結果を以下のとおり取りまとめた。

I. 量子ビーム応用研究の推進方針について

1. 研究開発の基本方針

基本方針は妥当である。量子ビームの優れた機能を総合的に活用する観点から研究計画を策定していること、科学技術イノベーション創出に向けて最終的なアウトカムを明確にして目標を定めていることは、センターの強みを活かしており、高く評価できる。これまで培ってきた成果を土台に、センター内外との連携強化、量子ビームの相補的・複合的利用を積極的に推進することは、方向として適切である。また、基本方針として、量子ビームを応用して、①科学技術イノベーション創出の促進、②科学技術・学術の発展、③産業振興への貢献としていることは大変明確である。

機構における量子ビーム応用研究関連部署は、我が国の量子ビーム利用研究を担う主たる組織であり、次期計画においても、そのミッションの重要性に鑑み、各種量子ビームの先端性とその応用技術を発展させるとともに、それらの複合的、横断的利用を積極的に推進すべきである。

個々の研究テーマは特色があるが、全体としての基本方針が十分には示されていない部分もあり、これについてはもう少しビジョンを明確にすべきである。また、研究開発テーマを科学技術イノベーション総合戦略と関連させる場合、その関係を明確にした方が良い。原子力、工業、農業、医療等の分野においても、機構の強みを活かした研究に重点をおき、重要テーマである福島復興支援とのバランスも考慮して、メリハリをつける必要がある。さらに、基本方針中の文言「目標達成のため、研究開発を効率的、効果的に遂行する」に、実効性を持たせるためには、具体的なチェック体制・機能を付与すべきであり、その具現化を期待したい。

また、限られた人的・物的資源の中で、基礎基盤研究から出口を見据えた幅広いスペクトルの研究開発の実施範囲、各量子ビーム・研究ユニットの持つ個性や特性を踏まえた、階層付け、複合利用等のあり方等についても、明確な問題意識を持ち、検討する必要がある。これら課題は相互に関係しており、その解決のためには、機構の量子ビーム応用研究における物質材料創製や先端計測解析等に係る外部との連携強化が重要と言える。

2. 組織・運営

センターの運営方針としてトップダウンとボトムアップとの融合は適切であり、既に具体的な効果も現れていることから、今後もさらに推進し、全体としてより大きな効果が得られるよう、努力して欲しい。また、横断的な組織運営が構築され、地区を跨って取り組むことで効率的に進めることができた研究テーマもあり、今後も継続して実施し、こうした成功事例を増やしていくべきである。今中期計画においては、多くの研究が、量子ビーム応用研究センター内、あるいは各地区間で展開されてきたが、次期計画においては、その研究をさらに発展させる必要がある。そのために各量子ビームと研究ユニットの持つ特性・個性を活かし、機構内外との連携を積極的に取り込んで、階層的あるいは垂直的展開を図るべきである。4地区の横断的組織の形成は重要であり、その点に

において、縦串である地区よりも研究領域を重視して、横串についても指揮系統をシンプルにした方が効果的とも考えられる。研究領域を中心に組織設計した場合、研究目標も明確になり、中長期計画が構築しやすくなることに加え、個々の研究の集合体ではなく、目標に向かって組織的に研究を進める体制となる利点がある。

組織運営体制の最適化については、早急に検討が必要である。現時点では、研究開発に携わるグループの具体的な体制・人数が不透明なので、実施を予定している研究開発の軽重が分かり難い。民間企業では、研究開発に関する重み付けを行い、人的リソース等をそれに基づいて配分することは多々ある。こうした重点化を進め、機動的な人員配置を心がけるべきと考える。

機構は責任を持って、量子ビーム応用研究のミッション遂行に必要な人材・資金等の資源の確保を次期計画以降も継続すべきである。十分な資源の確保が困難な場合、限られた人的・物的資源で、研究開発の展開について、明確な戦略を持つ必要がある。その一つとして、創製した新奇材料や、開発した先端計測技術などを活用し、優れた成果をあげ、それらと呼び水として、外部機関とWIN-WINの連携を構築・展開することが挙げられる。そのためには、常に最先端を目指した独自研究に取り組み、常にポテンシャルを高めておく必要がある。

加えて、量子ビーム関連施設・装置の一般ユーザーへの更なる開放、並びに他機関とのより緊密な連携をとるための組織運営及びバックアップ体制の構築を望む。機構が保有する量子ビーム施設を有効に活用するためには、外部との連携は極めて重要になる。大学等との共同研究や連携講座等への参画、他の研究独法等との共同研究体制の構築、先端基礎研究センター等機構内における更なる連携強化等に積極的に取り組むべきと考える。産業利用に貢献するためには、基盤研究の充実とともに、その結果得られた研究成果を実用化に結びつけることが重要であるが、そのためには産業界、臨床現場等の応用領域でのニーズを、執行部を中心に組織的に、幅広く、かつ正確に吸い上げることが必要である。上記の課題への対応のために、人員体制の充実は重要であり、今後、更なる体制強化が望まれる。

外部資金獲得は、研究者個人の裁量だけでなく、組織全体としての方策を企画・検討すべきである。運営交付金の大幅な減少を直視し、外部資金の獲得に万全を期すべきと言える。特に国などの公的資金だけでなく、企業からの研究資金の収集を増やす努力と対策を検討して欲しい。大型競争的資金への応募の場合、産業応用との繋がりも重要である。量子ビーム施設の整備で、多額な予算を費やしているが、外部資金を獲得する場合、それを利用した研究の出口や産業応用を意識した連携等も明確に示していく必要がある。

3.量子ビーム施設の整備と運用

陽電子施設の整備、SPRING-8 IIを見据えたビームラインの高度化等については、全て重要であり、妥当なものである。陽電子施設に関しては、陽電子の強みを活かす意味で、極表面分析、グラフェン等の原子1層で形成される材料を調べるプローブとしての利用は、極めて効果的であり、放射光・中性子等に続く新規の観測手法として大いに期待できることから、早期の整備を期待したい。既存の量子ビーム技術の開発・高度化や偏極低速陽電子の発生・利用技術の開発等、将来的に重要となる新技術開発は、外部との連携を積極的に図り、展開していくべきである。また、施設の整備・高度化に当たっては、それ自体を目的とはせず、出口となる研究開発を第一義とすることに留意して

欲しい。一方で、施設維持費の確保も重要な課題であり、十分な対策と配慮が必要である。

機構では、国内有数の施設群をベースとした量子ビームプラットフォームを活かすことが強みと言える。このプラットフォームを国内外の研究機関との共同研究・施設供用等に適した運用の仕方の更なる検討を進めるとともに、研究コミュニティ、社会一般に向けて活動・成果をアピールしていくことを望む。学术界で広く役に立つ量子ビームプラットフォームを運営している意義を高めることが重要であり、例えば、独自研究、共同研究の成果だけでなく、施設供用による成果もバランス良く評価されることによって、こうした量子ビーム施設の存在価値はさらに高まるであろう。

一方で、機構の量子ビームプラットフォーム構想では、全ての施設が並列に取り扱われる印象であり、今後は、施設の重点化等も考慮していくべきである。新規の量子ビーム施設・設備の整備は、研究の共通基盤であるプラットフォームの維持・強化に繋がり、その点においても積極的に進めて欲しい。高崎研のユーザーズオフィスに関して、こうした窓口を通じて、ユーザーコミュニティの意見を聞く体制・機会等を作るべきである。JRR-3、SPring-8等については既に大きなコミュニティがあり、その意見が反映される仕組み等があった方が、優れた成果の創出、ユーザー・応用分野の拡大等に繋がると考える。

JRR-3については、再稼働を確実に実施すべきである。その際には、運用にかかわる安全問題に対して、今まで以上の万全を期して欲しい。放射光や中性子等の物質評価のための共通基盤的な設備・技術は、それらの開発・高度化を担う研究ユニットも含めて、次期計画における位置づけを明確にすべきである。J-PARCのパルス中性子と原子炉からの定常中性子の使い分けを、組織的に対応できる機関は、機構のみであり、世界的に見ても重大な責務を担っている。米国、英国等においても、大強度パルス中性子利用が開始されたが、偏極中性子に関しては定常中性子の方が圧倒的に高精度のデータを出していることから、定常中性子の特長を活かした装置群も高性能化され、その利用促進を図るとともに、パルスと定常中性子との相補的利用も積極的に実施している。こうした事例を踏まえつつ、機構としても、J-PARCとJRR-3の両方を稼働する理由づけ等を考えるべきである。両施設の円滑な相補利用のための制度整備等も必要であり、同じ試料を測定するための手続き等を簡便にすべきである。また、機構の研究対象であるべき核燃料物質関連の実験をJ-PARC/MLFでも早期に実施可能となることを望む。

II. 研究計画について

1 全体の研究計画

本研究計画は、社会的な出口を強く意識して、研究テーマが設定されているとともに、これまでの実績を活かし、より発展・展開させる考え方であることから、全体として妥当と言える。また、各研究ユニットが次期計画に向けて、それぞれ特徴的かつ意欲的な取り組みを提示していると評価できる。「放射線と物質との相互作用」や「量子ビームテクノロジーの体系化」等、量子ビームの位置づけを的確に捉えており、こうした考え方を基にして、研究を進めていくことは妥当である。一方、研究テーマの内容は、総花的のようにも見え、量子ビームの基盤整備、量子ビームの複合利用、基礎基盤研究から出口を見据えた幅広の研究等のように、今中期計画と同様、各ユニットの研究が並列的なスタンスで提示されており、各量子ビームや研究ユニットの個性・特性を活かす点で、若干物足りなさも感じられる。短期的・中長期的な課題、目標達成の可能性、アウトカムの観点等

を踏まえ、必要に応じて研究テーマの重点化、選択と集中等を考えることも重要である。イノベーション創出、科学技術の発展、産業の振興に照らし合わせ、インパクトの強いテーマを優先して実施すべきであり、世界のトップレベルを目指す姿勢を明確にして研究を進めることを期待したい。また、各ユニット内において、試料の作製、ビーム利用実験、データ解析、シミュレーション、装置建設等の研究に必要な項目をすべて実施しているように見えるが、こうした計画を達成するためには、相当数のプロフェッショナルの研究者が必要であり、その実現性を踏まえる必要がある。

人材育成や人材交流という人的資源に関する議論や J-PARC に関わる膨大なデータを扱うための貯蔵・取り出し・解析に関わるツールといったソフトの検討も必要に応じて実施して欲しい。

機構側で出口を決めて、研究テーマを掲げて実施していく場合は、それを実施する明確な理由を示すことが必要であり、福島復興対応のように、明確かつ喫緊の課題等を具体的に示し、機構の強みを活かして課題に取り組んでいくことが望ましい。一般的に、量子ビーム施設を有する側は、研究ニーズをターゲットとして、シーズ側の技術を拡充・高度化する考え方が重要である。研究ニーズに関しては、外部機関が持っている場合もあり、自分達の既存技術・研究テーマに捉われず、それらを含めて軽重をつけるべきと考える。

2. 量子ビーム機能性分子解析技術研究（医療・バイオ応用領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

タンパク質の中性子構造解析技術の高度化は重要であり、中性子の長を活かして水素・水和水を考慮に入れた研究手法は正しく、現在の課題設定は妥当である。J-PARC の生体高分子解析専用の中性子回折計の建設とその分子解析技術の開発研究を基盤として、外部機関と連携して、新しい中性子構造・ダイナミクス融合解析のための技術開発を行うという計画の目的は明確である。その研究の出口も新規医薬品の創製、バイオによるエネルギー生産、生体超分子に関する反応の理解と、明確であり、研究課題の選定は妥当と言える。また、解析対象となる生体高分子は従来よりも大型であり、これまで得られなかった大型生体分子の構造や物質との結合状態などに関する情報が得られるものであり、革新性も高い。

機構の研究テーマとしての適合性に関しては、機構の強みと、外部との連携により、それを更に活かせることを明示して、推進して欲しい。また、中性子の強みがより明確となるように、従来技術である放射光構造解析と多次元 NMR 解析と比較し、分子機能の解明における中性子構造解析の利点・長を明示する必要がある。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

各研究テーマにおいて、方向性、達成目標、最終的な出口も明示され、6万～10万以上の分子量のタンパク質の構造解析の創薬への展開、がんの構造解析による新規抗がん剤の開発等、目的も明確にしており、妥当である。J-PARC の新しい生体高分子用の回折装置については、多くの研究者が期待している。その建設に関しては、このユニットが中心になって整備するが、利用研究、ユーザーサポートに加え、大型単結晶育成も行うことになることから、限られた人的資源や物的資源の配分を踏まえた体制を構築するとともに、この分野での研究を先導する明確な指針も必要である。特に、中性子構造解析に関する技術・研究手法に関しては、スタッフ全員に係るので、寄与の大小

はあると思うが、総力を挙げて対応して欲しい。また、ユニット内で育成した単結晶を利用し、中性子による先端的研究結果を戦略的に外に向かって発信し、それを“呼び水”として、数多くの外部ユーザーを呼び込むことで、外部との連携を活性化させることも一案である。

一方で、分子イメージング、シミュレーション等については、機構で実施する意義や量子ビーム連携利用との関連が十分には読み取りにくいところがある。また、創薬開発に関する出口は意識されているが、エネルギー生産に関する意識が薄く、その面での具体的アイテムも少ないと思われ、この点については、今後さらに検討を深めて欲しい。

③研究計画の妥当性について

各研究テーマにおいて、それぞれの研究計画はこれまでの実績を基盤とした確固としたものであり、達成目標、最終的な出口への繋がりも妥当なものである。中性子回折、散乱、シミュレーション、さらには、試料作製結晶化、と総合した強みを生かすことを目指していることは評価できるが、研究計画の中では、新しい中性子回折装置や既存の回折装置による中性子構造解析に関する技術開発に重点を置くべきである。タンパク質大型結晶化に関しては、既に多くの構造生物学者が手がけているので、機構としては、中性子構造解析を汎用化することが使命であると考えられる。特に大きなタンパク質複合体の構造解析技術の確立は、構造生物学の分野から大きな期待が寄せられている。

分子イメージング技術に関しては、4名程度の小人数で、期間内で達成することについては若干不安が残るが、他の機関と連携したプロジェクトの一翼を担う形であれば理解できる。機構の立場だと、中性子源を持ち、中性子の構造解析装置に関する部分を主に担うことになるが、生命科学分野の放射光の研究者は、放射光だけでなく実際に構造を研究することも実施しており、それで初めてその測定に適合した装置を作ることができる。こうした観点で、装置建設だけに捉われずに、研究開発を進めていくべきである。人的資源が制限されている場合、外部の研究者との連携の強化、かつ分野的に特化した研究推進の必要もあろう。大型結晶化についても、他の機関にはエキスパートは多くおり、研究の加速のためにも連携協力することも肝要である。

④総合意見

中性子利用研究は科学技術全体でみると馴染み深いという状況ではなく、その有用性を積極的にPRすることを考えるべきである。構造解析の対象に関しては、創薬と連動したタンパク質に狙いを絞る方が効率的と思われる。また、実験データとシミュレーション技術を有機的に活用することで、新規薬剤の開発に大きく貢献することを期待する。

3. 量子ビーム材料評価・構造制御技術研究（物質・材料領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

中性子の特長を活かした研究開発は妥当である。磁性材料を中心とした物質・科学研究や残留応力評価等、中性子の強みが発揮される分野に注力して、課題設定をしていることは評価できる。特に磁性材料に関しては、JRR-3再稼働の際には、偏極中性子による高精度のデータ取得が期待できるので、積極的に取り組んで欲しい。また、JRR-3の定常中性子とJ-PARCのパルス中性子との相補的利用による研究開発に取り組む姿勢は適切である。東海地区に設置されている両施設の定常と

パルス中性子を最も効果的に利用できる立場にあるので、これらの相補利用を積極的に展開すべきである。また、独自の研究と研究支援の関係を明確にし、独創性の高い研究を推し進めて欲しい。

一方で、研究開発課題が総花的となっており、個々の研究テーマに関しても、機構で実施すべき意義が不明なものもあるように思われる。ナノレベルの材料からコンクリート構造体まで対象が広範囲であり、ターゲットを絞ることも一案である。また、研究開発のアウトカムに関しても、具体的なイメージが見えないところがある。例えば、コンクリート内部の残留応力評価についても、実際に役立つことが非常に重要であり、従来技術とも比較して、将来的な中性子による手法の位置づけを示していく必要がある。

現状のスタッフの人数を考慮すると、JRR-3の再稼働後は、明確な方針を持って施設運営に臨まないと、JRR-3とJ-PARCの二つの施設を今の人員体制と運転資金で同時に運営・利用することは困難に見える。次期計画においては、JRR-3の14台の装置に関して、その中で主に利用すべき装置、停止すべき措置も含めて、それらの運用方針を考えていく必要がある、その際は、施設供用とは別途、外部機関と共同研究すべき課題も、ある程度決めておく必要がある。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

3つの施設が有機的にリンクした研究課題であり、妥当である。中性子の強みを活かした研究開発に注力することは理解できる。ただし、研究開発の方向性をもう少し明確にする必要があり、研究期間が終わった時点で、達成・未達成の判断が難しい目標設定のテーマもある。また、設定している目標やアウトカムが、「安全性の向上」、「機構の解明」、「利用効率向上」など、定性的な表現に留まっているが、可能な限り定量的な目標を掲げて推進する必要がある。また、先端基礎研究センターで取り組んでいるスピントロニクス関連研究への寄与についても検討すべきである。

③研究計画の妥当性について

計画は概ね妥当である。一方で、施設供用、そのための装置運用と独自研究とを関連付けて、具体的な方針の検討、及び計画立案を行う必要がある。本研究計画だけではないが、ツールを主体に研究テーマを設定しているように見えてしまう点が残念である。また、モデル実験ばかりの印象で、アウトカムまで到達する過程が不透明である。アウトカムまでの道筋を明確に意識して研究を着実に推進する必要がある。

④総合意見

JRR-3等の施設供用について、メリハリをつけて取り組むという方針は適切である。また、装置の維持管理、施設供用だけでなく、独自研究にも注力し、優れた成果を創出することを期待する。また、パルス中性子源J-PARCと定常中性子源JRR-3の二つを相補的に利用するための制度整備等が十分ではなく、外部利用者からも、より簡便にして欲しいとの要望がある。JRR-3とJ-PARCが両方稼働した際には、東京大学物性研究所、高エネルギー加速器研究機構、及び日本中性子科学会等の関係諸機関・団体とも十分に意見交換をしながら、施設運営に当たって欲しい。また、競争の激しい研究分野であるので、ユーザーコミュニティとの密な情報交換に基づき、ノウハウを確実に積み上げていくことを期待する。

4. 医療・バイオ応用量子ビーム技術研究（医療・バイオ応用領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

最先端の放射線技術を用いて取り組む研究課題は、現在、医療・バイオ分野で高いニーズがあることに加え、多彩な照射施設を用いる強みも活かしており、研究方針も明確である上、横断的な研究体制になっており、その課題選定は妥当である。また、低線量被ばくの解明、アスタチン-211（At-211）の製造と利用、DNA 損傷に関する研究等、ビジョンも明確である。

元素の選択的移行や生長に伴う元素分配の定量的な解析手法の開発は独自性が極めて高く、優れた研究成果をもたらす革新性の高い課題である。農業の基盤をなす植物の生育は、必須元素の吸収と移行、再分配によって成り立っていることに鑑みると重要である。また、医療分野への応用研究も重要であり、放射線が人体に与える影響については着実に進めて欲しい。低レベル放射線の影響を調べることは重要な研究課題であるが、具体的な研究の方向性を明確にする必要がある。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

提案されている研究課題について、その方向性、達成目標、最終的な出口も明示されており、妥当なものである。放射線の人体に対する影響についての研究は重要であり、機構の特長も活かしている。新しい突然変異体の開発については、花の色などの花卉の高付加価値化も良いが、農業分野においては、もっと重要かつ喫緊の課題があるはずであり、研究対象の更なる検討を望みたい。医療分野、農業分野では研究成果の実用化に向け、早い段階で適切な外部機関との共同研究を進める必要がある。

③研究計画の妥当性について

研究計画は、これまでの実績を基盤とした確固たるもので、達成目標、年度展開、方向性、最終的な出口への繋がりも妥当なものである。各種線源を利用し、計画に沿って研究開発を進めることで、目的の成果を達成しうると期待できる。

④総合意見

放射線生物と農業応用に重きが置かれた課題設定になっている。重点分野の一つとして農業があるが、積極的に推進して欲しい。「核農学」というキーワードは、革新的で非常に重要な提案である。福島復興に係る研究開発について、Cs-137 対応植物用ガンマカメラ技術の開発は重要な成果である。放射性セシウムの植物体内移行が可視化可能になったことで、イオンビーム育種によるセシウム高吸収イネ、あるいは低吸収イネの開発が促進される。イオンビーム育種は様々な可能性を秘めた技術であり、今後も積極的に推進して欲しい。

放射線によって誘発される細胞死の機序の解明は、これまで検討されてこなかったが、生物への影響や放射線治療上、極めて重要な情報であり、研究の発展が期待される。また、新規内部放射線治療薬の開発においては、最近この分野で注目されている α 線放出放射性同位元素の利用を考慮し、機構の加速器によって生産可能で、管理上の対応が容易な At-211 を用いる放射性薬剤の開発を計画しているが、その新規性は高く、開発研究の発展が期待される。さらに、植物を対象とした RI イメージング技術の開発は、植物の栄養動態の解明に繋がるとともに、その成果が福島復興のため

の農業生産に重要かつ有効な情報を提供することも期待され、着実に推進すべきである。

5. 環境・産業応用量子ビーム技術研究（環境・エネルギー領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

選定された研究テーマは妥当である。スピン偏極陽電子ビームに関する技術開発は、革新性が高いが、ターゲットとする先端材料が幅広い分野（エネルギー、半導体、医療、資源回収）にわたっており、重点的な課題を明確にする必要がある。燃料電池や触媒を出口とした開発については、企業等からのニーズを把握した上で進めることで、より実用化に近づけられると考える。高分子材料によるネオジウム（Nd）やジスプロシウム（Dy）の回収技術は、高レベル廃液処理とも関係しており、横断的な研究をすることで、より効果的に成果が創出できると期待される。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

量子情報処理から耐放射線電子回路の宇宙開発への応用、福島・廃炉対応まで広い視野でイオンビームの活躍する場が考えられており、方向性は妥当である。生体適合性材料に関しては、開発の方向性が決められる原理的な実験を優先する必要がある。

③研究計画の妥当性について

共同研究・施設供用等の実績を踏まえて、計画はよく考えられており、妥当と言える。幾つかの研究項目については、具体的な開発時間も考慮しており、良く練られている。今回提示された開発スケジュールには、ある程度の目安が示されており、毎年の計画を長期的な視野で策定しやすくなる利点がある。また、放射性物質の減容化に関する研究については、早期にその効果を検証すべきである。

④総合意見

本研究開発においては、量子ビーム応用研究センター内での連携が取れている印象がある。燃料電池、空気電池の開発に当たっては、実用化のノウハウを有する共同研究先を早期に確保すべきである。開発目標に「燃料電池の開発」と記載されているが、燃料電池自体、または部材の開発なのか、明確にして取り組んで欲しい。研究成果・開発技術を応用に繋げ、社会に還元していくことを特に期待する。

6. 荷電粒子・RI 利用技術開発（先進ビーム技術領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

計画の中で示されている、ビーム生成・加速・制御技術、計測及び照射技術の開発は、様々な応用研究に有効な基盤技術であり、妥当と言える。ニーズへの対応とシーズ技術の提供は極めて重要であり、その考えに基づいた選定と言える。ユーザーズオフィスに関しては、次期計画で新規に設置することは有意義である。

GeV 級の重イオンビームに注力することは、そのビームによる利用課題やユーザーを想定すべきであり、その必要性を明示すべきである。また、TIARA 以外の施設に関しても同様に、出口と

なる研究開発を明確にして、施設の高度化を進めて欲しい。位置的情報のために照射を制御することは、技術としては重要ではあるが、機構内の研究者のためのニーズにも見える。こうした技術は拡がりがあるので、外部ユーザーも意識して、実際に利用して頂くことも考慮しながら技術開発に取り組んで欲しい。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

量子ビームの複合的利用を念頭にして、利用者の視点に立った研究開発計画となっており、目標・方向性は妥当である。ユーザーズオフィスの開設については、評価できる。具体的な課題を認識して、設定しているが、ニーズに関しては、既存ユーザーだけでなく、新規・外部ユーザーの分も拾い上げるような取組みも行って欲しい。

③研究計画の妥当性について

共同研究、施設供用等の体制を整備し、外部ユーザーのニーズに即した汎用性のある技術開発を望む。ユーザー対応に関して、より広くユーザーの意見を反映していくことは大事ではあるが、供用施設での大きな問題として、人員の不足も挙げられるので、その対策も考えていく必要がある。

④総合意見

ユーザーオフィスの開設、コミュニティの形成を意図しており、それが首尾良く進むことを期待する。このため、ビーム技術の応用範囲の拡大を目指すとともに、ユーザーの認知度を上げるための広報活動を考えて欲しい。

次期計画で進める技術開発は、多岐にわたっており、有意義である。一方で、こうした研究計画を効率的に進めるに当たって、確固たる体制・陣容を構築すべきと考える。

7. 先進ビーム技術研究（先進ビーム技術領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

我が国で唯一のフェムト秒超短パルス超高強度レーザーを有する研究組織として、レーザーの高性能化、利用研究の目標は妥当である。また、J-KAREN-Pの早急な完成と利用研究への開放を期待する。核変換断面積に関わるデータ取得、高強度レーザー技術の高度化、X線レーザーによる微細構造観測技術の開発等は、必要性が高いテーマと言える。特に、パワーレーザーの更なる高強度化は、レーザー駆動粒子線の加速能を向上し、それらを使った核物理、超短パルスを使った超高速現象の解明、加速器に替わる極短パルスのX線発生装置の開発等に繋がっていくと期待できる。

一方で、設定されているそれぞれの課題が、具体的に、どの学問分野の推進に寄与するか不明な部分もあり、J-KARENの更なる高度化に対する意義付けをもっと明確にしていく必要がある。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

当該分野の研究者のニーズに沿った内容で、妥当と言える。J-KARENの高度化を完了し、利活用していくことが一番重要な目標である。一方で、韓国 4PW、欧州 10PW に対して、J-KAREN は 1PW なので、国内のユーザーにとっては朗報ではあるが、機構としては、国際的な研究開発状

況下における位置づけを明確にしつつ、高強度レーザーの開発・高度化に今後とも注力して欲しい。

課題設定、研究計画等を、本委員会で提示された「量子ビーム応用研究の推進方針」に従い、あらためて整理することも検討して欲しい。また、各研究テーマで設定されている数値目標については、意味が分かりづらい点がある。技術の向上自体は明確だが、研究のゴールを分かりやすく示していく必要もある。また、将来的に、研究開発の目的がレーザー開発だけとにならないよう、出口も意識して設定していくことが肝要である。

③研究計画の妥当性について

加速器による量子ビーム発生に対して、レーザー生成量子ビームの特長を活かすための具体的研究目標の策定が望まれる。また、数値目標が実績に基づいて設定されている点はわかりやすいが、開発に必要な研究資金等の確保に関しては不明な点が多く、現時点では評価が困難である。また、重粒子や陽子線の他施設との異なる特徴を示して欲しい。機構独自の、照射施設の優位性を活かした課題発掘ができることを望む。

④総合意見

レーザー技術と加速器利用技術の融合は、新規技術の開発につながるものと期待できる。諸外国が、韓国を含めて4PW化、さらには欧州では10PW化の開発が進められている中で、J-KAREN-P特有の性能や独自のアイデアによる研究課題の差別化が重要である。また、それらを実施するに当たり、国内ユーザーの発掘とコミュニティづくりも重要な課題であるので、施設供用のサポート体制等の整備も望まれる。特に、サポート体制については、実験サポートのみならず、機構の強みである理論解析等についてもサポートを期待したい。また、コンパクトX線自由電子レーザーの実現についても大いに期待している。

8. レーザー応用技術研究（環境・エネルギー領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

放射性廃棄物処理技術、非破壊核種分析技術、極短パルスレーザーによる光制御技術の研究等、必要なテーマを選定している。特に、レーザー量子制御法による同位体分離は、興味深いテーマであり、Cs-135のみの核変換が実現すれば、大変価値は高く、革新的と言える。こうした福島対応での重要課題の一つである長寿命核種の分離技術の確立・実用化について、このユニットへの期待は大きい。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

各研究テーマは、基礎から応用までビジョンを提示しており、目標達成の可能性も高く、妥当と言える。同位体分離に関して、現在開発中の高輝度ピコ秒パルス列及びテラヘルツ（THz）パルス制御（QUADRA-T）研究に注力することは、重要課題の一つである。

また、機構において構造解析に利用されている中性子、放射光等と比べると、テラヘルツはmeVのエネルギー領域であり、中性子のエネルギーレベルと近いので、相補的な活用が期待できる。テラヘルツは時間分解能に優れ、中性子は空間分解能に優れるといった特長を活かし、地区間の連携

で、新しい課題・研究テーマを立ち上げる等の取り組みを実践して欲しい。

③研究計画の妥当性について

QUADRA-T の開発研究は、主として外部資金である光拠点事業にその予算的裏付けがある。光拠点事業が残り 3 年であることから、THz 光源実用化までの十分な予算確保と人員体制の充足に関して、これまで以上の努力が必要であり、ユニット、センターとしても、より明確なロードマップの策定が必要と考えられる。

④総合意見

機構の量子ビーム応用研究の最大の強みの一つは、中性子、放射光、テラヘルツ等の主な量子ビームを全て有することであり、それらをさらに有効活用する体制構築を検討すべきである。例えば、meV 級エネルギーの THz 光でバイオ応用を含む種々の分子構造のスクリーニングを広範に行い、興味ある分子構造に対して中性子、放射光を用いて高空間分解能の分析を行うための計測装置、解析手法のプラットフォームを構築できれば、関連分野への貢献は極めて大きい。当該研究は、複数の地区・部署と共同して進める体制になっており、かつビジョンも具体的であり、次期計画期間内の成果創出が期待しうる。シナリオの難易度は明確ではないところもあるが、レーザー応用に関しては、社会からの期待度が高い分野であり、今後の展開を期待したい。

9. 原子力・産業応用レーザー技術開発（環境・エネルギー領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

地元企業等との連携、福島廃炉への貢献等、必要な具体的テーマを掲げており、妥当である。革新性が高いとはいえないが、重要な課題を選定している。ニーズに対応して課題を選定していること、既存の技術を産業応用につなげる考え方も妥当であり、その必要性は高いと評価できる。一方で、研究開発項目は、従前の量子ビーム応用研究とは開発の位置づけが異なるようにも見える。また、将来に向けた技術開発は、より大きな目的を持って進めるべきである。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

原子力の課題解決に役立つレーザー技術の開発であり、目標が明確であり、方向性も妥当である。原子力施設の保守・保全や福島廃炉技術等、具体的かつ必要な技術の開発を目指しており、成果の有効利用が期待できる。

③研究計画の妥当性について

概ね妥当と言えるが、現状の限られたスタッフで、掲げられた問題の解決の可否については、判断できないところもある。

④総合意見

福島環境回復、福島原発内部の状況観測、及び廃炉に向けた機構全体の活動における、量子ビーム応用研究センターの独自の活動、及び機構内連携の取り組みの中での量子ビーム応用研究センタ

一の位置づけについての説明が必要である。特に、炉心燃料の解体・取り出し、劣化コンクリートを含む構造材の処理等、廃炉には多くの困難な課題が予想され、レーザーと他の技術との使い分けや複合利用等について、機構内での方向付けや外部への情報発信と国内外の知の結集体制の構築が望まれる。

これまでの経緯もあり、現状では、他地区との連携が薄いという印象を受ける。他の施設とどのように情報を共有して問題解決に当たれるかに留意した組織運営を期待したい。

10. 量子ビーム物性制御・解析技術研究（物質・材料領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

高輝度 X 線光源である SPring-8 の特徴を生かした先端的なテーマであり、妥当である。特に X 線と中性子との相補利用が相乗効果を生むことが予想される課題に力点をおいて研究を進めることを期待する。一方で、アウトカムとして記載されている超高効率太陽電池、新規水素貯蔵材料、高温超電導材料などの先端素材の技術分野に関して、どのように寄与していくかが明確ではない。また、オペランド材料評価、極限環境下測定、先端的量子ビーム測定、及び量子シミュレーションを主課題としているが、これらの課題の相互関係が見えるようにし、応用分野への総合的な取り組みであることが望ましい。

海外の放射光施設や SPring-8 の他のビームラインの動向と比較して、機構が行う放射光研究の特徴をどこに求めるかを意識する必要がある。また、記載してある開発課題としては、十分に達成できるものが並んでいて、革新性や独自性に乏しいとも感じられる。基礎研究に近い組織でもあり、失敗を恐れずにチャレンジする部分がないと研究チームとしての活力が失われる恐れがある。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

研究の方向性等は妥当である。研究開発の柱として掲げられているオペランド材料評価、極限環境下測定についても妥当と考える。一方で、ビジョンが曖昧なところもあるが、個々のテーマを有機的に繋げ、相互に補完することで、目標が確実に達成できることを期待したい。

水素吸蔵体に関しては、劣化メカニズムの解析だけでは、記載されている新規材料の開発は不可能と考える。吸蔵能力を支配する因子の解明に寄与するモデル物質の選定とその解明が必要である。

ビームラインの運営組織としての立場もあり、2020 年までの 5 年間に、計画されている SPring-8 の高度化への対応、開発すべき手法、改良すべき装置等も含めて検討しておくべきである。現在、議論されている中規模高輝度放射光計画に対する関わり方についても検討を急ぐ必要がある。また、放射光のヘビーユーザーとしての立場で研究を続ける場合、研究テーマ自体に原子力機構としての特徴が求められるであろう。

また、ビームラインを有する機構の重要な研究課題としては、測定法の高度化・開発がメインになると考えられるが、空間分解能に係る技術開発が多く挙げられており、数値も明確に提示されている。その数値を目標とする理由については、明確にしておく必要がある。

③研究計画の妥当性について

研究計画は概ね妥当である。世界最速の歪、形状計測技術が確立すれば、その意義は大きい。実

用水素吸蔵合金のオペランド計測も、着実に進めるべきである。人員に制限がある一方、特長あるステーションなので、SPring-8Ⅱまでの期間は、空間スケールに注目して研究を実施していくことは妥当と言える。

一方で、1ミクロン以下のビーム集光、電場下での測定、0.1ミクロン分解能の磁区観察などは、国外だけでなく国内でも既に実現されており、次期計画の達成目標とするのは疑問が残る。測定手法に革新性がなくても良いが、その場合は、次期計画で達成する研究成果を明確に打ち出して欲しい。また、スーパーコンピュータによるシミュレーション技術を応用し、Cs吸脱着材料、貴金属代替触媒、高温超電導材料、ナノ磁性体などへのメカニズム解析技術の展開を考えるのであれば、最も効率的に解析する手法を考える必要がある。

11. 量子ビーム反応制御・解析技術研究（環境・エネルギー領域）

①研究開発課題選定の妥当性について

十分納得できる課題設定である。4つの主題、アクチノイド化学、環境・構造物性、電子構造物性、溶液・融体化学の位置づけ、相互の関係が明確である。マイナーアクチノイド分離用化合物の設計、粘土鉱物からのCs脱離に関するテーマは非常に独創的である。東日本大震災前から、このマイナーアクチノイド研究は注目するところがあったが、今回、その研究パターンをセシウム除去剤などの研究開発に適用したことは高く評価できる。高レベル廃棄物の減容化については、現場の意向を十分に確認し、実用化できる技術に仕上げるべきである。

②方向性・目的・目標等の妥当性について

放射光および中性子のユーザー的な立場から研究が企画されており、研究の方向性は機構らしい特徴が出ており、妥当と言える。各種放射光を利用した研究であり、その目標と放射光の高度化の両方が達成可能と期待できる。一方で、燃料電池車の実用化に関しては、課題と解決策を再度整理すべきである。

③研究計画の妥当性について

国内外の研究機関との連携、地区間の連携が含まれており、目標を十分に達成できる、妥当な計画と言える。

④総合意見

社会的に大きなインパクトを与える可能性のある研究テーマが含まれていることから、研究が順調に進捗し、社会の期待に応えられる成果の創出に繋がることを期待する。アクチノイド化学を使用できる放射光施設を目指しており、この分野の基礎を支える中核的研究機関になって欲しい。さらに、次世代放射光源への積極的関与によって、高輝度、短パルスビームを用いた新しい研究環境を追求することも重要である。

III. まとめ

量子ビーム応用研究の全体の推進方針は、妥当である。量子ビームの優れた機能を総合的に活用

する観点から研究計画を策定していること、科学技術イノベーション創出に向けて最終的なアウトカムを明確にして目標を定めていることは、センターの強みを活かしており、高く評価できる。また、第1期、第2期と同様に、量子ビームの相補的・複合的利用の積極的推進を進めることは有効である。各量子ビームの特徴とその利用に適した研究開発を的確に捉え、医療、産業、福島復興等の出口イメージに繋げていくとよい。医療に関しては、群馬大学とタイアップすることで、他の粒子線医療との差別化も可能となり、位置づけもより明確になると考える。

一方で、量子ビーム応用研究のミッション遂行に必要な人材・資金等の資源の確保は、大きな課題である。限られた予算・人員を効果的に活用するために、研究テーマの重点化・メリハリをつけることに配慮すべきである。トップダウンとボトムアップとの効果的な融合、及び研究員個々の士気の向上は、組織を円滑に機能させる上で重要と言える。特に、若手人材の育成・活躍に留意した運営体制・研究実施体制の構築を期待する。今後の組織運営や外部資金、人員等の研究リソースの確保に関しては、機構内外の連携協力を効果的に進めることが重要となる。

陽電子施設等の新規量子ビーム施設の整備や SPring-8 II を見据えたビームラインの高度化等については、我が国の研究開発における重要な共通基盤である量子ビームプラットフォームの維持・強化に資するものであり、着実に進める必要がある。こうした量子ビーム施設の安定・継続的な運転は、機構の責務であり、人的配置や維持費などの予算配分等について配慮すべきである。量子ビームに係る装置とそれを活かす技術等については、人員・スタッフの確保も含めて、積極的に維持・発展させ、それらを踏まえた運営を切望する。

J-PARC のパルス中性子と JRR-3 の定常中性子の相補利用を積極的に進め、効率的・効果的に両施設を運用するための制度整備に取り組むべきである。J-KAREN や TIARA 等については、施設供用等を通じて、外部ユーザーの利用促進を図るとともに、そのための体制整備に努めて欲しい。

個別の研究計画についても、全体的に妥当である。それぞれの研究ユニットが自らの強み・特長を活かした計画を立案したことは評価できる。機構改革等で、組織・体制等については、不透明な部分があるが、外部機関との連携、適切な人的配置、及び研究テーマの重点化等により、次期計画期間中に研究目標が達成できると期待している。

研究評価については、学術論文等のアウトプットだけでなく、施設の運転・保守・管理や福島復興への対応等、機構が期待されている活動や研究支援の活動も重視するとともに、プラットフォーム（量子ビーム施設の運用）に対する評価にしても、利用件数・人数ではなく、利用を通じて得られた研究成果を指標にすることも一案である。

センター及び関連する研究開発拠点の移管に当たっては、リソースを公平かつ適切に機構から新法人に配分するとともに、移管後も機構と新法人の間で引き続き緊密な連携・協力関係を構築することが望まれる。

機構は、希少な大型施設・設備を保有し、我が国の量子ビーム研究を担う先端研究機関である。特徴的な先端量子ビームの応用技術を発展させ、その利用研究を幅広い分野に展開するという量子ビーム応用研究に関するミッションの重要性は近年益々高くなっている。今後の取り組みに注目するとともに、量子ビーム応用研究の今後の発展を大いに期待する。

以上

付録

日本原子力研究開発機構作成資料

付録 1

研究開発課題の事前評価について（諮問）

This is a blank page.

26 原機(量)014

平成26年 7月 1日

研究開発・評価委員会
(量子ビーム応用研究・評価委員会)
委員長 田川 精一 殿

独立行政法人日本原子力研究開発機構
理事長 松浦 祥次郎

研究開発課題の事後／事前評価について（諮問）

「研究開発・評価委員会の設置について」(17(達)第42号)第3条第1項に基づき、
次の事項について諮問します。

記

〔諮問事項〕

- ・「量子ビーム応用研究」に関する事後評価
- ・「量子ビーム応用研究」に関する事前評価

以上

This is a blank page.

付録 2

事前評価説明資料

- 量子ビーム応用研究の推進方針 (伊藤センター長)
- 次期中期計画における研究計画
 - ・量子ビーム機能性分子解析技術研究の計画 (黒木ユニット長)
 - ・量子ビーム材料評価・構造制御技術研究の計画 (武田ユニット長)
 - ・医療・バイオ応用量子ビーム技術研究の計画 (小林ユニット長)
 - ・環境・産業応用量子ビーム技術研究の計画 (前川ユニット長)
 - ・荷電粒子・RI 利用技術開発の計画 (小嶋部長)
 - ・先進ビーム技術研究の計画 (近藤ユニット長)
 - ・レーザー応用技術研究の計画 (杉山ユニット長)
 - ・原子力・産業応用レーザー技術開発の計画 (大道所長)
 - ・量子ビーム物性制御・解析技術研究の計画 (坂井ユニット長)
 - ・量子ビーム反応制御・解析技術研究の計画 (矢板ユニット長)

This is a blank page.



資料10B-1

第10回量子ビーム応用研究・評価委員会

— 事前評価 —

平成26年10月21日



量子ビーム応用研究の 推進方針

日本原子力研究開発機構 (JAEA)
原子力科学研究部門
量子ビーム応用研究センター(QuBS)

センター長 伊藤 久義

①



目次



1. 研究開発の基本方針
2. 組織と体制
3. 量子ビーム応用研究の展開
4. 第3期中期計画における研究計画(骨子)
5. 量子ビーム施設の整備・高度化・運用

②



1-1. 研究開発の基本方針(1)

—量子ビームを応用した先端的な研究開発の推進—



- 中性子、ミュオン、荷電粒子、ガンマ線、レーザー、放射光等の各種量子ビームの発生・制御・利用等に係る最先端技術開発を推進するとともに、量子ビームの優れた機能を総合的に活用して、原子力や医・理・農・工の幅広い分野において世界を先導する研究開発を推し進め、革新的成果の創出や先進量子ビーム利用技術の普及拡大を通して、科学技術イノベーション創出を促進し、我が国の科学技術・学術の発展、産業の振興等に貢献することを目指す。
- 研究計画の策定では、科学技術イノベーション総合戦略2014等の科学技術政策等に記載される重要課題に対し、先進量子ビーム技術を高度化・活用して解決を図る観点で、取り組むべきテーマを選定する。研究開発成果の最大化のため、最終的なアウトカムを明確に想定して目標を定め、その達成に向けて研究開発を効率的・効果的に遂行する。
- 効率的・効果的な研究開発の観点から、センター内外との連携強化、量子ビームの相補的・複合的利用の積極的推進に注力する。また、先進量子ビーム技術の高度化、利用促進の観点から、外部研究機関や大学、産業界と連携して、高強度陽電子利用研究施設をはじめとする次期量子ビーム施設整備等についても検討を進める。

③



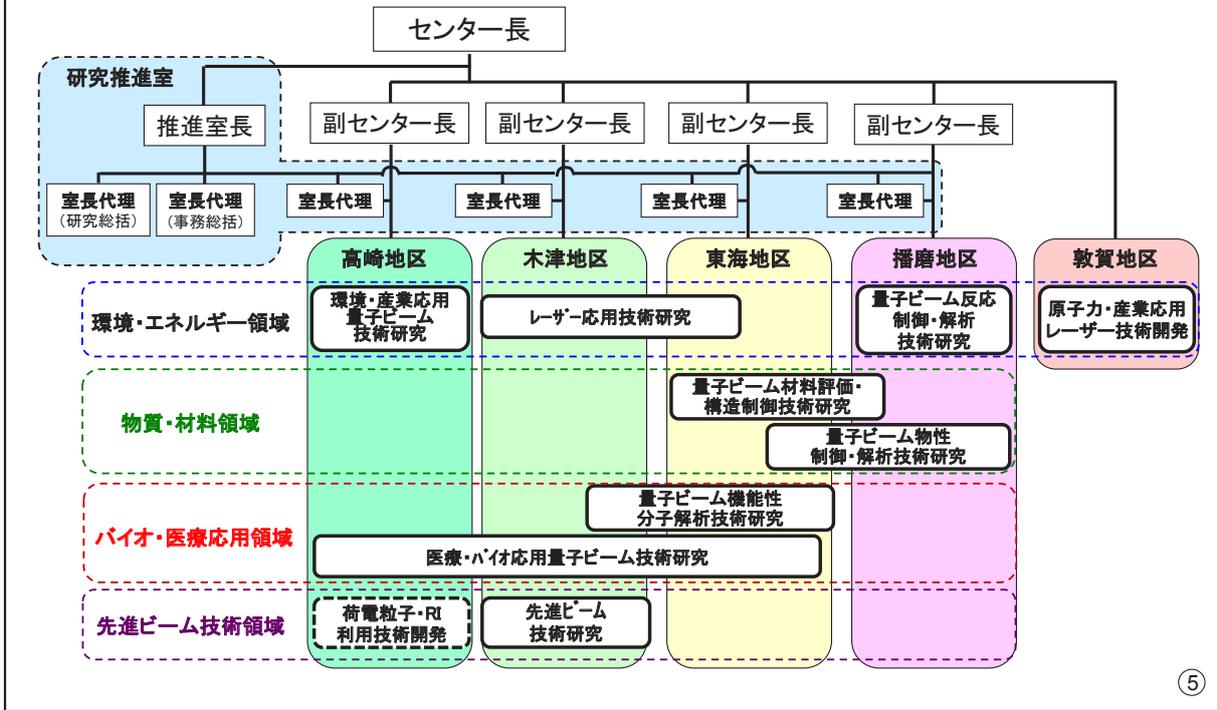
1-2. 研究開発の基本方針(2)



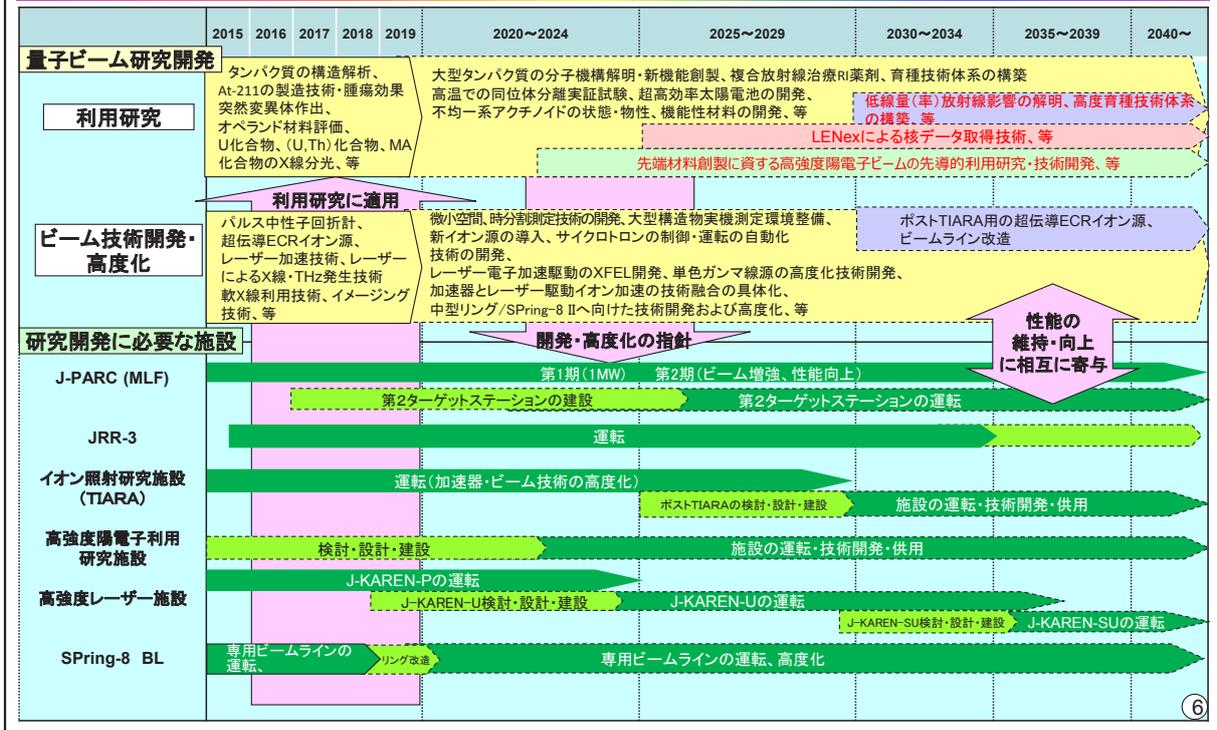
④



2. 組織体制



3. 量子ビーム応用研究の展開





4-1. 第3期中期計画における研究計画(骨子)



<原子力基礎基盤の維持・強化>

量子ビーム応用研究

中性子、荷電粒子、光子、放射光等の各種量子ビームの発生・制御・利用等に係る最先端技術開発を推進するとともに、量子ビームの優れた機能を総合的に活用して、原子力や医・理・農・工の幅広い分野において世界を先導する研究開発を推し進め、革新的成果の創出や先進量子ビーム利用技術の普及拡大を通して、科学技術イノベーション創出を促進し、我が国の科学技術・学術の発展、産業の振興等に資する。

個別研究(東海地区)

量子ビーム機能性分子解析技術研究

- ・重水素化技術を含む試料作製技術及び結晶大型化技術を高度化
- ・放射光、X-FEL、Cryo電顕などの新しい分子イメージング手法と連携した分子構造・ダイナミクス解析手法を開発
- ・マルチスケールシミュレーション技術と量子ビームデータ情報を統合したシミュレーション技術開発により生体超分子の動作原理を分子論的に解明

量子ビーム材料評価・構造制御技術研究

- ・中性子による多重自由度の複合ダイナミクス観測を通じて、将来応用が期待される創発機能発現機構を解明する手法を開拓
- ・広い空間スケールに渡る階層構造の測定・解析技術を開発させ、複合物質の一次構造から高次構造までの階層性と機能との連動性を明確化
- ・中性子および放射光による実機模擬環境下その場内部構造測定技術を開発

⑦



4-2. 第3期中期計画における研究計画(骨子)



個別研究(高崎地区)

環境・産業応用量子ビーム技術研究

- ・非白金アルカリ水素燃料電池用高分子膜材料創製を目的に、幅広い空間スケールで材料構造・機能を制御・解析する技術を開発
- ・先端触媒材料の創製を目指し、酸素還元活性が発現する微細構造を制御性良く形成できるイオン照射・電子線照射技術を開発
- ・ワイドバンドギャップ半導体中へ単一光子源となる欠陥を効率的、且つ、位置制御して形成する技術を開発
- ・低損失スピントロニクスデバイス評価等に寄与するため、スピン偏極陽電子ビームの発生・制御・利用技術を開発
- ・電子線グラフト重合により高性能金属捕集材のレアメタル吸脱着能を制御する技術を開発
- ・放射性廃棄物の減容化に貢献するため、植物残渣等有機系放射性廃棄物から放射性物質を抽出可能な技術を開発
- ・MGyレベルの耐放射線性を有する電子回路及びその回路を実装した耐放射線性ロボット要素技術(アクチュエータ)を開発
- ・水・放射線環境下における高分子材料の劣化評価試験技術を開発するとともに、防水材等に使用される高分子材料の放射線劣化挙動データをまとめ、データベース化・公開

医療・バイオ応用量子ビーム技術研究

- ・重イオンマイクロビーム細胞照射技術を開発
- ・放射光X線を用いた細胞照射効果と生体分子損傷の解析法及びライブセルイメージング技術を開発
- ・細胞死や発がんの機構解明に向けた難修復性DNA損傷の細胞内導入法やハイブリッド軟X線顕微鏡装置を開発
- ・イオンビーム誘発変異において特定の突然変異形質を高頻度に誘発させる因子を解明
- ・細胞殺傷能力の高いアルファ線を放出するアスタテン-211 (At-211)を使った新しいがんの内部放射線治療薬を開発
- ・植物を対象としたRIイメージング技術を開発・体系化し、農業における植物生産システムの高度化に直接貢献する新規学術分野の基盤を構築
- ・植物RIイメージング技術とイオンビーム育種技術を活用し、植物体内部における放射性セシウムの移行機構を解明し、移行抑制技術を開発

荷電粒子・RI利用技術開発

- ・TIARAにおけるビーム生成・加速・制御技術等を開発
- ・TIARAにおける高強度MeV級クラスターイオンに係る発生・加速・ビーム技術等を開発
- ・TIARAにおけるビーム計測・照射技術等を開発

⑧



4-3. 第3期中期計画における研究計画(骨子)



個別研究(木津地区)

先進ビーム技術研究

- ・重イオンや短寿命核種等の生成・引き出し技術に直接結びつく、レーザー駆動多価重イオン引き出し現象を実験的に検証
- ・コンパクトX線源やガンマ線源を旨とした高強度レーザー技術の高度化と新たな量子ビーム源の可能性を探索
- ・X線レーザーの10Hz化を図り、巨視的領域を高速に走査可能な物質表面微細構造の観察技術を開発
- ・超高強度レーザーとその実用的な利用のための要素技術を開発

レーザー応用技術研究

- ・レーザー駆動型の高強度テラヘルツ光発生装置(QUADRA-T)を用いて、模擬分子の同位体選択的回転・振動励起法の基本原理を実証
- ・レーザー・コンプトン散乱ガンマ線を利用した核共鳴蛍光非破壊測定(NRF-NDA)技術を高度化
- ・一般産業への応用を目指して、レーザー光センシングの基盤技術を確立
- ・レーザー光照射によって廃棄物中の白金族元素(PGM)を分離回収するための要素技術の開発と実証
- ・光ファイバ伝送をベースとしたレーザー及び光学手法による炉内検査技術を開発

原子力・産業応用レーザー技術開発

- ・原子炉構造物などを構成する金属/非金属材料の溶断/破碎技術を開発。また、発生する物理現象を定量化するため、計算科学シミュレーションコードを開発
- ・原子炉等の構造体の溶接部などに対し、強い地震や経年劣化などによる強度の低下を適宜モニターし、補修する技術を開発

⑨



4-4. 第3期中期計画における研究計画(骨子)



個別研究(播磨地区)

量子ビーム物性制御・解析技術研究

- ・新規物性の発現・新規電子デバイスの結晶成長制御を可能にするコヒーレントX線散乱・回折・分光手法を開発
- ・放射光を利用したその場時分割材料評価システムを高度化
- ・水素貯蔵合金の実用化に向けた課題解決を行うほか、次世代を見据えた新規材料の創製技術を開発
- ・放射光を用いた先進的な回折・散乱法を開発
- ・理論模型の大規模数値シミュレーション技術を開発し、実験データを解析することにより、高温超伝導材料・新規触媒・セシウム吸着材料等の機能を理論的に解明

量子ビーム反応制御・解析技術研究

- ・アクチノイドなど重元素に特異な化学結合、構造特性の解析から、燃料処理、廃棄物処分に資する有用な有機材料を開発するとともに反応機構を解明
- ・アクチノイド化合物やその関連物質の電子構造を明らかにし、これらの化合物の物性発現機構を究明
- ・次世代の高機能材料開発に寄与するため、物質の結晶構造と電子系の動的性質を放射光で「その場」観察することにより、機能発現機構を解明
- ・放射光顕微表面オペランド分光分析技術を開発
- ・原子力施設の電源喪失を伴うシビアアクシデントに対応した水素処理システム、及び放射性廃棄物貯槽内で発生する水素の処理システムを開発
- ・再処理工程における溶液系の反応、高レベル廃液のガラス熔融固化、吸着材を使用した放射性物質の回収など溶液・融体の関与する反応系の放射光分析手法を開発
- ・粘土鉱物中でのセシウムの化学結合状態を解明

⑩



5.量子ビーム施設の整備・高度化・運用



JRR-3の再稼働



● H26.9.26 設置変更許可申請

- ・原子力規制委員会の安全審査
- ・施設定期検査
- ・関係自治体等への説明

H27年度中の再稼働を目標

● 実験装置の利用運転再開

- ・中性子高度利用技術開発
- ・先導的研究の推進

▶ 先端研究施設共用促進事業の再開

- ・ユーズオフィス業務の推進



J-KAREN等のレーザー施設の利用促進

木津地区のレーザー装置



高度化したJ-KAREN



軟X線レーザー



QUADRA-T

・J-KARENレーザーの高度化を受け、高強度レーザーや、レーザー駆動の荷電粒子ビーム、X線、THz波源の新たなユーザーの開拓と施設の共用を推進



高強度陽電子利用研究施設の整備

次世代の新たな量子ビームである「世界最高強度かつスピン偏極陽電子ビーム」を発生・制御・利用する研究施設の整備のため、概念設計、基本設計等を実施

陽電子の特徴

θ = 0.1-0.0°
最表面の構造を決定 結晶中の空隙サイズや濃度を決定
最表面電子のスピン偏極率を決定

電子リニアック

対生成
偏極電子→偏極陽電子
世界トップの高強度陽電子利用研究施設の早期実現

環境、エネルギー、情報通信、医療、バイオ技術等の広範な分野における革新的成果の創出・普及

科学技術イノベーション

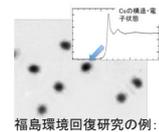
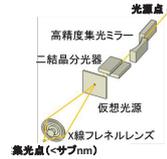
- 1) クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現
- 2) 国際社会の先駆けとなる健康長寿社会の実現
- 3) 世界に先駆けた次世代インフラの整備
- 4) 地域資源を「強み」とした地域の再生
- 5) 産学官の優れた人材が活躍できる環境の整備

SPring-8専用ビームラインの高度化

- SPring-8アップグレードへの対応
→挿入光源・BLの改造、ナノ集光光学系導入など
- 原子力・アクチノイド科学研究ビームラインの製作
(放射性試料取扱自由度とビームタイムの拡充)
→福島環境回復研究の加速



専用ビームライン



福島環境回復研究の例：
イメージングXAFSによる焼却灰中セシウムの分布と局所電子状態解析

資料10B-2

量子ビーム機能性分子解析技術研究の計画

黒木 良太

1

第3期中期計画における機能性分子解析技術研究

概要

J-PARC/MLFに生体高分子解析専用の中性子回折計の建設を支援する。同装置による新しい研究分野の創成に呼応する“**中性子構造・ダイナミクス融合解析**”を実現するための技術開発に着手する。従来の中性子利用技術をさらに高度化し、生命科学研究における中性子利用の拡大を図る。

【研究分野の動向】

◎ JRR-3停止中に生体高分子を対象とした中性子回折計の設置が急増。3施設→8施設稼働へ

◎ 生体高分子の機能解明に、大きな貢献が期待できる構造研究では、これまで欠けていた水素原子+水和水の把握(精密な解析)へ。

◎ 中性子回折、散乱、シミュレーションの三大技術を結集したユニットは、QuBSのみ。

【次期中期計画における重点目標】

- 1) “強み”となる中性子装置の確保と大型分子解析への対応
→ J-PARC新装置開発、JRR-3独自装置(BIX-3,4)の活用
- 2) “中性子関連3技術”(構造・ダイナミクス・シミュレーション)の連携強化
→ プロジェクト研究の実施
- 3) 外部研究機関との連携強化
→ 光量子融合連携研究開発プログラムの活用

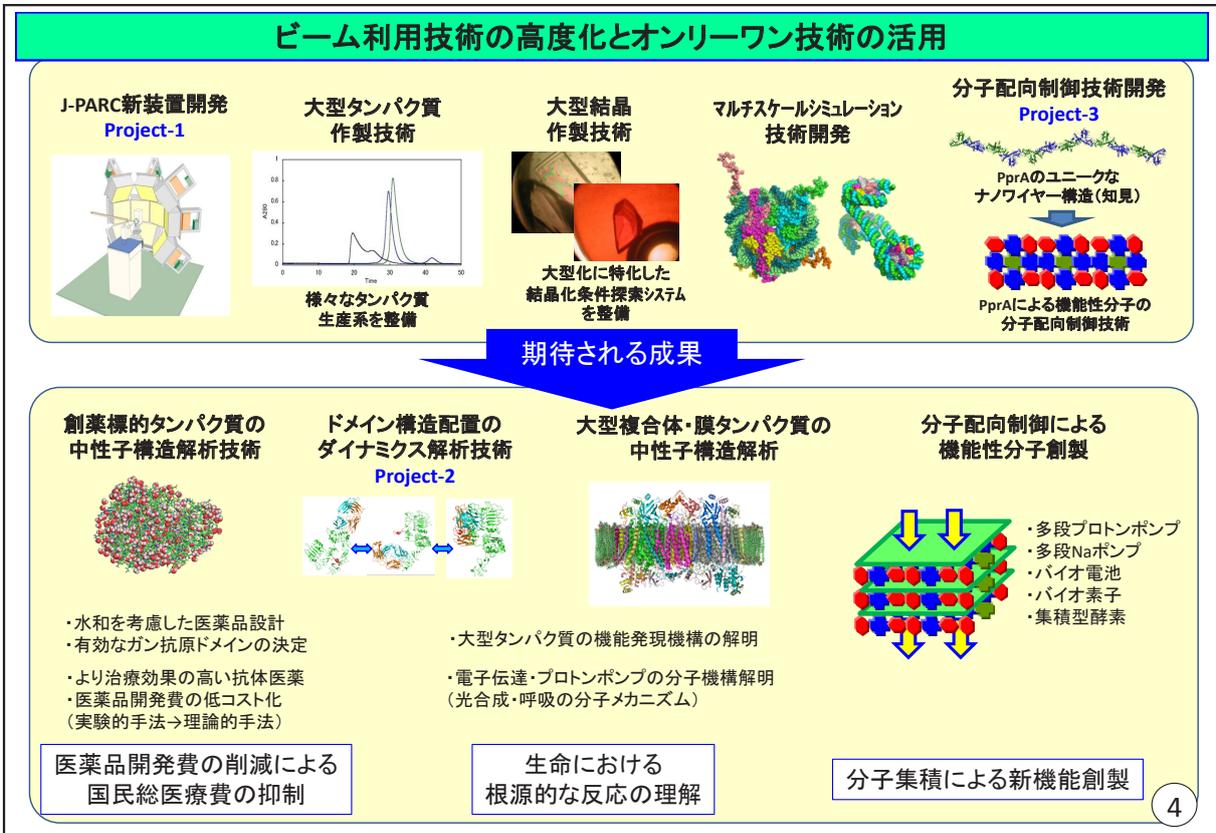
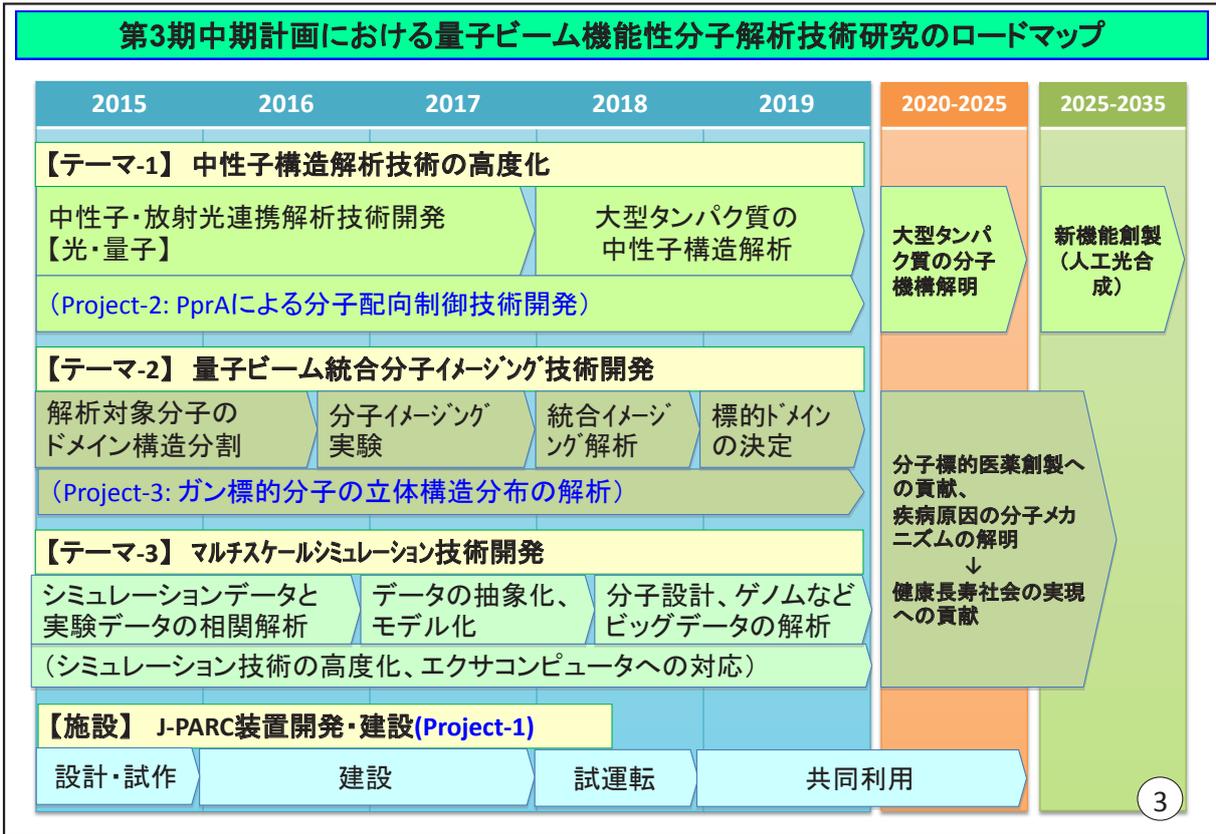
【実施する研究開発のイメージ】



【期待される成果】

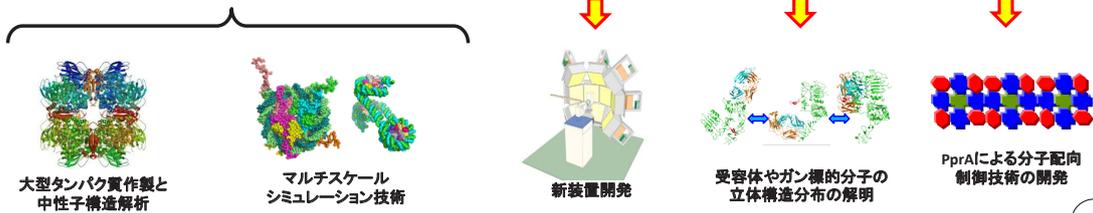
産業面: 新規医薬品の創製、エネルギー生産への貢献
学術面: 生命の根源的な反応の理解

2



次期中期計画で推進する研究テーマとプロジェクト

研究開発テーマ	Project-1 新装置開発	Project-2 マルチメイン分子の立体構造分布	Project-3 PprAlによる分子配向制御技術
【テーマ-1】 より大型分子の中性子構造解析を実現する 中性子構造解析技術の高度化	装置開発	試料作製 機能解析	試料作製 結晶化
【テーマ-2】 構造・ダイナミクス情報を統合した量子ビーム複 合利用技術開発	装置開発	小角散乱、 非弾性散乱	小角散乱
【テーマ-3】 より大型分子の動的挙動を理解するための マルチスケールシミュレーション技術開発	構造解析プログラムの高度化	シミュレーション、小角 散乱、非弾性散 乱	シミュレーション 分子設計



5

各研究テーマ説明資料

6

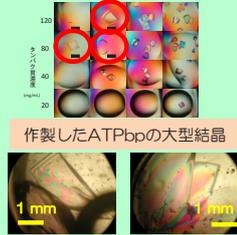
研究テーマ名：中性子構造解析技術の高度化（利用基盤技術開発）【外部資金：光・量子PJ】

**研究の
ねらい**

中性子および放射光ビームを利用した大型タンパク質の全原子構造解析に貢献するため、重水素化技術を含む試料作製技術および結晶大型化技術の高度化を実施する。

これまでの実績

・タンパク質の大型結晶を効率よく作製するスクリーニング技術(SNCC法)を開発を通じて、複数の創薬標的タンパク質の大型結晶作製に成功した。



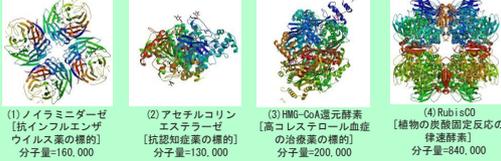
達成目標

- ・完全重水素化した大型タンパク質試料作製技術の確立と中性子による立体構造解析の実現。
- ・大型結晶作製条件のデータベース構築。

実施する研究開発

・従来の装置制限(unit cell<100Å)を大きく超える大型タンパク質の中性子結晶構造解析を実現するため、パルス中性子回折計の開発(Project-1)および、光・量子プログラムによる重水素化大型タンパク質の作製技術、大型結晶作製技術等の高度化を実施する。さらに独自の知見に基づくPprAによる分子会合制御技術の開発に着手する(Project-2)。

技術開発研究において解析対象とする分子量10万を超える大型タンパク質



最終的なアウトカム

- ・創薬標的タンパク質の全原子構造解析(試料1-3)は、分子標的治療薬の創製に寄与。
- ・環境及びエネルギー生産に関わるタンパク質(試料4)の解析は、バイオリクターに用いるバイオ素子の創製に寄与。

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・JRR-3: BIX-3, BIX-4
- ・J-PARC: iBIX, 建設計画中の新回折装置
- ・FRM-II: BioDIFF (ドイツ)
- ・放射光施設 KEK PF, SPring-8

7

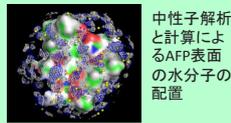
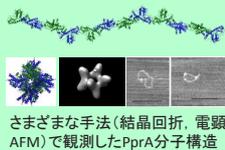
研究テーマ名：量子ビーム統合分子イメージング技術開発

**研究の
ねらい**

J-PARCにおける様々な中性子散乱装置の稼働に伴い、放射光、X-FEL、Cryo電顕などの新しい分子イメージング手法と連携した分子構造・ダイナミクス解析手法を開発する。特に、中性子散乱・回折の統合的解析手法を構築することによって、生命科学分野への手法の普及をめざし、幅広い分野での成果創出の礎とする。

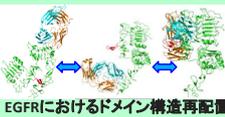
これまでの実績

様々な生体高分子の構造・ダイナミクスの解析が注目され始めている。複数の量子ビームを用いて、水和水を含む生体高分子の構造とダイナミクスの変化の相関を明らかにした研究例は少ない。しかしQuBSでは、PprA(遺伝子修復促進)やAFP(不凍タンパク質)、筋肉関連タンパク質の構造機能解析に応用してきた。



実施する研究開発

- ・中性子・X線同時解析法に用いる構造辞書の改訂による高度化。
- ・中性子散乱・回折の統合的解析法構築を目指し、J-PARCに設置予定の中性子結晶解析装置および中性子小角散乱装置を組み合わせた統合解析法の開発を行う。
- ・複数のドメイン構造からなる創薬標的タンパク質の立体構造分布を、国内の先端施設(SPring-8, SACLA)やCryo電顕によって取得し、構造・ダイナミクスの特徴を解析する。(Project-3)



解析の対象となるのは、創薬標的タンパク質(キナーゼ)の阻害剤結合変化や、受容体タンパク質(TPORやEGFR)など。キナーゼおよびEGFRは代表的な創薬標的分子

達成目標

- ・様々な立体構造データと中性子小角散乱、中性子非弾性散乱解析法との統合による解析手法の構築。
- ・複数のドメイン構造を持つ創薬標的タンパク質のドメイン相対配置の解明と治療標的の決定。

最終的なアウトカム

- ・より高い治療効果を発揮できる創薬標的の決定によって新規抗がん剤の創製に貢献する。
- ・開発期間や開発費の減少による国民総医療費の抑制へ貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

- J-PARC/MLF,
- SPring-8/SACLA,
- PF

8

研究テーマ名:量子ビームデータを統合したマルチスケールシミュレーション技術の開発研究

**研究の
ねらい**

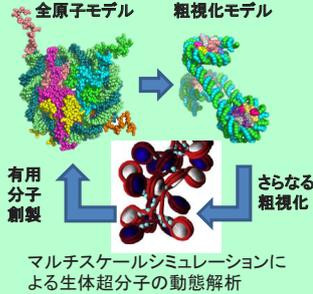
100ペタフロップス計算機(京コンピュータの10倍)を活用するマルチスケールシミュレーション技術と量子ビームデータ情報を統合したシミュレーション技術開発によって生体超分子の動作原理を分子論的に解明することにより、新規有用分子の創製に資する。

これまでの実績

京コンピュータなどの高速計算機に最適化した独自開発の大規模シミュレーションプログラムによって、生体超分子の動的なふるまいの解明を行ってきた。

実施する研究開発

100ペタフロップス計算機(京コンピュータの10倍)を活用するマルチスケールシミュレーション技術の開発を実施、量子ビームデータを取り込んだシミュレーション計算を行うことによって、さまざまな時間、空間分解能での分子の動態解析を行う。特に、DNAの転写、組換え、複製、損傷修復に関わる生体超分子の動作原理を理解する。また、データの抽象化を行うことによって、ゲノムデータなどのビッグデータ解析方法の開発を行う。さらに、上記の動作原理に基づき、分子機能をより高めた新規有用分子の創製に資する。



達成目標

- 量子ビームデータを統合したマルチスケールシミュレーション技術の開発
- 量子ビームデータとシミュレーションデータの相関解析による新規分子イメージング技術の開発

最終的なアウトカム

- 生体超分子、特に、DNAの転写、組換え、複製、損傷修復に関わる核内核酸タンパク質複合体の動作原理の理解、解明
- 生体超分子のみに作用する、特異性が高く、かつ、副作用の極めて少ない創薬の開発に向けたターゲットの原子モデルの提示

高度化、利用する量子ビーム施設

- 放射光施設 KEK PF, SPring-8
- 中性子施設 J-PARC
- X線自由電子レーザー施設 SACLA

資料10B-3

量子ビーム材料評価・構造制御技術 研究の計画

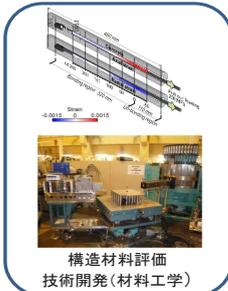
武田 全康

1

第3期中期計画における量子ビーム材料評価・構造制御技術研究

概要

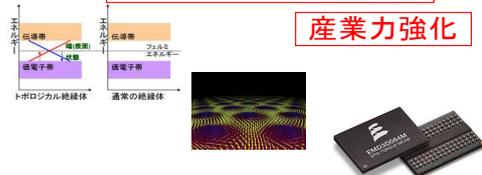
中性子による高精度計測技術を発展させ、他の量子ビームも複合的に利用した先導研究を行うことにより、科学技術イノベーションを支える先端材料研究開発を促進させるとともに、評価技術の高度化を通して、産業競争力強化や環境エネルギー問題解決に貢献する。



新規学問分野の開拓

先端材料研究開発促進

産業力強化



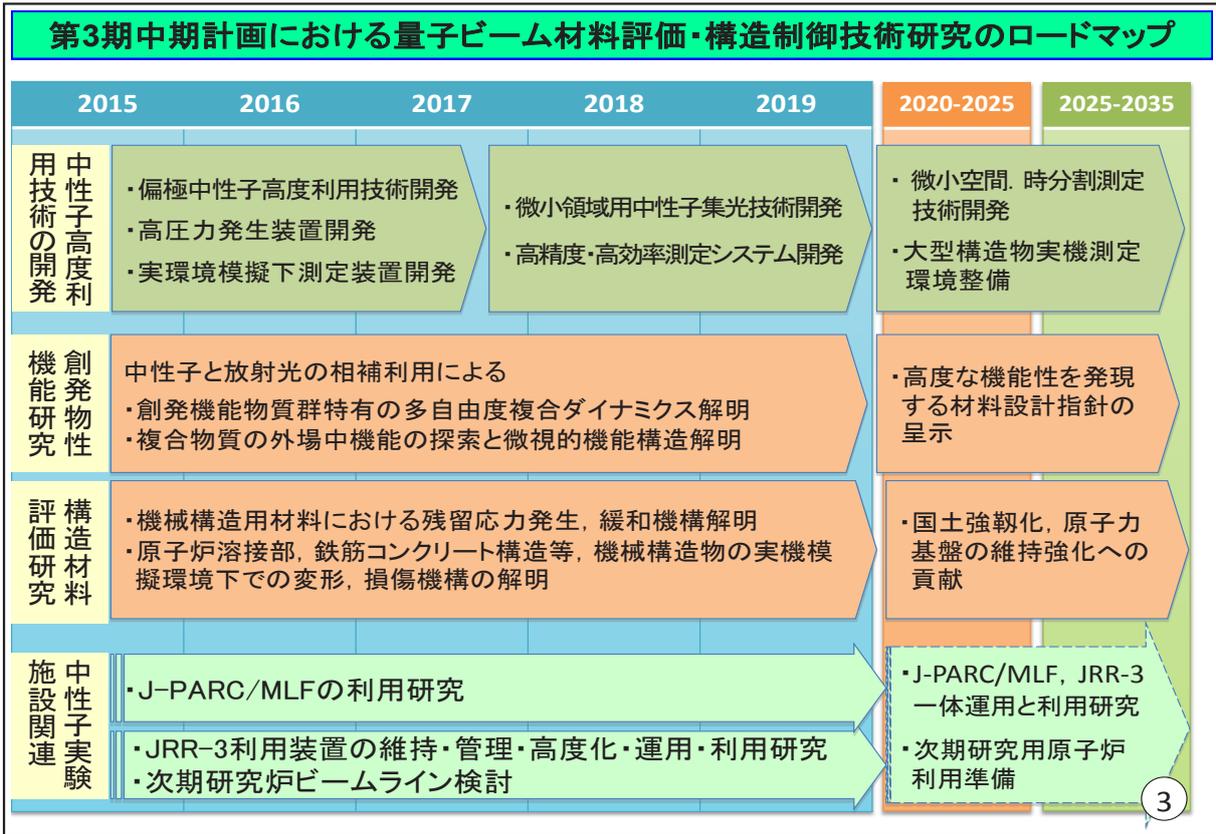
中性子の持つポテンシャルをさらに強化
先導研究

環境・エネルギー問題解決

国土強靱化への貢献



2

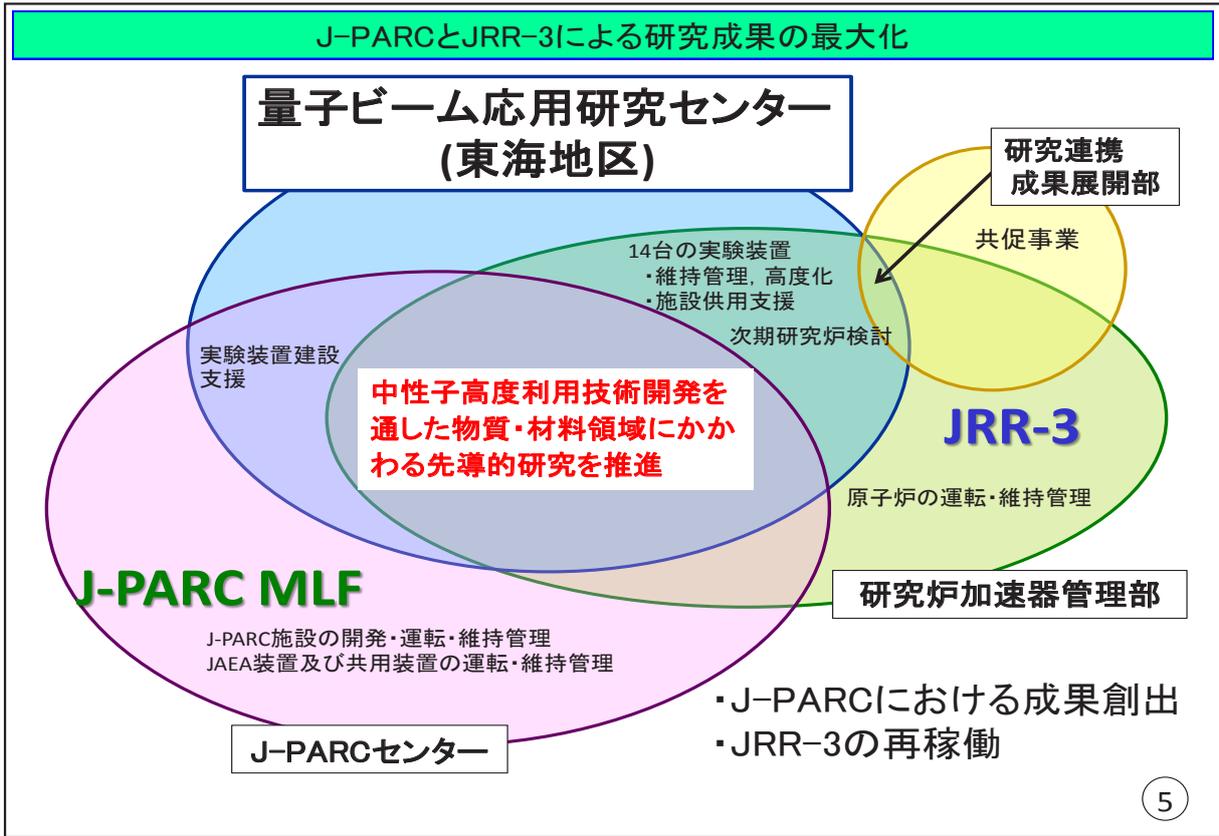


第3期中期計画において実施すべき研究開発課題

- 選定の根拠
 - － 国の施策(第4期科学技術総合戦略, 科学技術イノベーション総合戦略2014等)に貢献するもの
 - － 機構の方針(科学技術イノベーション創出のハブとしての「量子ビームプラットフォームの整備」及び「量子ビームサイエンス&テクノロジー」を推進する)に貢献するもの
 - － 成果の最大化に直結する研究開発を行う能力を持つとともに, 課題解決に対してユニット内の研究者に強い意欲があるもの

課題	方向性	根拠
1	創発物性機能解明技術開発(物性物理)	中性子のより高度な利用技術開発(偏極中性子利用技術, 集光技術, 特殊試料環境など)を通し, 先端材料開発に結びつく知見を得るとともに, 新規学問分野の開拓にも貢献する(テーマ1, 2)
2	構造材料評価技術開発(材料工学)	各種構造材料, 原子カプラント材料等の実環境模擬下での評価技術を開発し, 強度信頼性の向上と革新的新材料開発に資するとともに国土強靱化にも貢献する(テーマ3)

4



各研究テーマ説明資料

7

研究テーマ名： 創発物性機能発現機構解明に関する研究

研究の
ねらい

中性子による多重自由度の複合ダイナミクス観測を通じて、将来応用が期待される創発機能発現機構を解明する手法を開拓する

磁気感受性

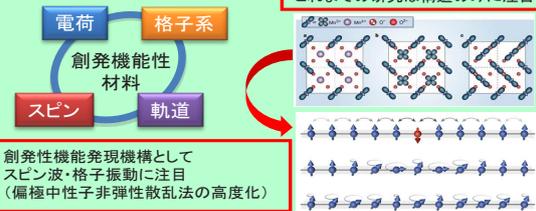
これまでの実績

・電場、磁場などの外場中の偏極中性子回折実験手法を確立し、 RMn_2O_5 や LuFe_2O_4 などのマルチフェロイック物質における磁気電気効果の機構を明らかにした。

実施する研究開発

・固体中の電荷・スピン・軌道といった自由度が強く相互作用することで、電子や分子の単なる集合としては予測不可能な機能が発現する物質原理を探索する新しい学問として創発物性科学が注目を集めている。
・電荷-スピン-格子-軌道多重度相関の強い影響下における特殊なスピン波、格子振動(複合ダイナミクス)の新規性の高い量子ビーム研究を実施し、創発機能発現機構解明・予測につながる知見を得る。
・また、そのために必要な高圧発生技術開発及び偏極中性子非弾性散乱装置の高度化を行う。

これまでの研究は構造のみに注目



達成目標

- ・JRR-3に設置されている偏極中性子非弾性散乱装置で観測可能なエネルギー領域の拡大
- ・創発機能を生起するための特殊試料環境(電場印加装置、超高压発生装置)の整備
- ・量子ビームを相補的に利用した創発機能発現機構の解明手法の確立

最終的なアウトカム

- ・強相関電子系における典型的な創発機能性物質群(遷移金属酸化物)の機能発現機構の解明
- ・上記知見を基にした、より高度な機能性を発現する材料設計指針の呈示
- ・創発物性科学の学理構築への貢献と、複合ダイナミクスの新規研究分野の開拓

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・JRR-3の3軸型分光器群の高度化
- ・J-PARC, JRR-3, SPring-8, SNS, ILL, ORNL, ESRFなどの海外中性子・放射光施設の利用、偏極陽電子ビームの利用

8

研究テーマ名： 多階層にわたる複合材料物質機能化に関する研究

**研究の
ねらい**

広い空間スケールに渡る階層構造の測定・解析技術を発展させ、複合物質の一次構造から高次構造までの階層性と機能との連動性を明らかにする

軽元素感受性、同位体識別能力

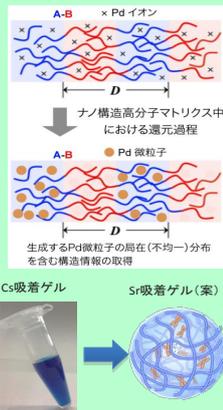
これまでの実績

- ・軽水/重水コントラスト変調法を利用し、固体高分子形燃料電池電解質膜の構造を解明した。
- ・中性子実験で得られた知見から、水中のCsを安定的に吸着する新高分子複合体の合成に成功した(特許)。

実施する研究開発

- ・中性子とマイクロビームを用いた放射光との複合・相補的利用により、1nm から10 μmにわたる構造解析から複合材料中で機能性触媒が高効率で作用する分散条件を多階層レベルで求め、それに基づいた材料開発を行う。

- ・微弱な中性子(回折, 小角散乱)を効率的に検出する技術, 光学系, 及びに試料環境技術を開発する。高分子複合体をはじめとした新除染材料を創成し, その機能構造を解明するとともに成果を技術移転する。



達成目標

- ・高分子やナノ粒子の新規相制御を目指したハイブリッド技術の開発
- ・中性子用湾曲型二次元検出器(WAND-Upgrade等), 光学系, 試料環境の開発
- ・極限環境下を含む高分子・水系等の機能構解明
- ・除染材料の開発と技術移転

最終的なアウトカム

- ・クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現の要素として, 複合・集積構造を利用した材料における技術革新に繋がる研究成果を創出する。
- ・J-PARC等から成果創出。除染材料等の機能解明, 創成と技術移転で復興再生に貢献する。

高度化, 利用する量子ビーム施設

- ・JRR-3の小角散乱装置とアクセサリ-の高度化, HFIRのWANDのアップグレード
- ・放射光施設(SPring-8), 海外原子炉施設(FRM-II, HANARO), パルス中性子施設(J-PARC, SNS)等の利用

9

研究テーマ名： 実環境模擬下での内部構造計測技術開発に関する研究

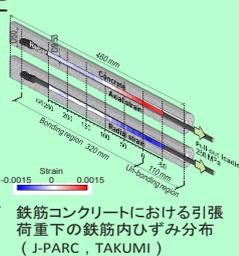
**研究の
ねらい**

中性子および放射光による実機模擬環境下その場内部構造測定技術を開発し, 産業競争力の向上や国土強靱化に貢献する

優れた透過力

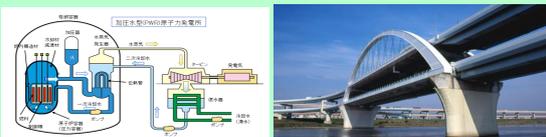
これまでの実績

- ・中性子によるその場測定技術により, コンクリート内部への水の浸透の実時間観察, コンクリートに埋設した鉄筋の三次元変形測定および溶接継手の熱サイクル下残留応力測定に成功した。
- ・パルス中性子集合組織測定システムを開発し, また, 入射中性子ビームの発散がひずみ測定精度に及ぼす影響を明らかにした。



実施する研究開発

- ・中性子, 放射光を用いた実機模擬環境下における機械・構造物の高効率内部構造評価技術やそれを支える計測技術を開発し, その技術を原子力プラントや土木・建築構造物などの機械・構造物の強度信頼性研究に応用し, わが国の産業競争力の向上ならびに国土強靱化に貢献する。



達成目標

- ・実機模擬環境下における機械・構造物の高効率かつ高精度な内部構造評価技術と計測技術の実用化
- ・開発した技術を応用して, 原子炉溶接部や機械部品の応力評価および土木・建築構造物の変形, 損傷機構解明のための基盤技術の確立

最終的なアウトカム

- ・原子力発電プラント等の機械・構造物の 安全性向上
- ・耐震性能等の向上によるインフラ強靱化
- ・交通機械等の軽量化, 高性能化によるエネルギー利用効率向上

高度化, 利用する量子ビーム施設

- ・JRR-3の残留応力測定装置の高度化
- ・J-PARC, JRR-3, KUR, SPring-8, ANSTOなどの海外中性子実験施設の利用

10

資料10B-4

医療・バイオ応用量子ビーム技術研究 の計画

小林 泰彦

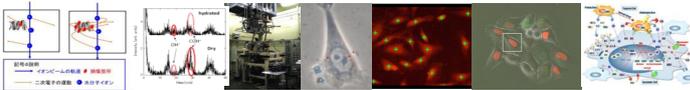
1

第3期中期計画における医療・バイオ応用量子ビーム技術研究

概要 最先端のRI・放射線技術を開発し、放射線生物作用のメカニズムの解明を基盤として、生物・医学・農学分野に応用する。そして、**生物・地域資源の創出、農林水産業の強化、健康長寿社会の実現、ふるさと福島への幸せな帰還と再生・復興**に貢献する。

RI・放射線利用と放射線防護は原子力科学の核心

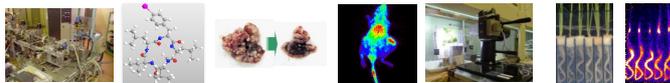
○放射線の生物作用機構を解明する技術開発
重イオンマイクロビーム(TIARA)、γ線、放射光X線など



○新しい突然変異体作出技術の開発 TIARA、γ線



○新規のRI製造・利用、計測・イメージング技術の開発
TIARA、RIバイオトロン、東海タンデム、JRR-3、SPring-8



○福島復興に係る研究開発 TIARA、Co-60
・放射性セシウムの植物移行抑制技術の開発



中長期の目標

- ・**幸せな帰還と復興**のための低線量(率)放射線生体応答の解明、放射線防護の改革
- ・**重粒子線がん治療**の副作用低減とリスク評価のための、重イオン照射効果の解明
- ・**生物・地域資源創出**のための目的の変異体が容易に得られる新規育種技術の開発
- ・**個別化医療**のための、複合放射線治療RI薬剤の開発
- ・**農業、環境保全技術の革新**のための「核農学」の確立

2

第3期中期計画における医療・バイオ応用量子ビーム技術研究のロードマップ						
2015	2016	2017	2018	2019	2020-2025	2025-2035
放射線生物作用解析研究 ・集束式スキャン重イオンマイクロビームの実用化(安定化、高精度化) ・重イオンと放射光X線による細胞照準照射・追跡観察技術の開発 ・生体分子の放射線損傷を調べる新しい分光法・構造解析技術の開発 ・哺乳動物細胞内における難修復性DNA損傷の検出手法の開発 ・線虫個体の細胞ネットワーク数理モデルの構築		・細胞集団全体の放射線応答解析技術の開発 ・難修復性DNA損傷の哺乳動物細胞への導入法の確立 ・ハイブリッド軟X線顕微鏡技術の開発 ・線虫個体の放射線応答のシミュレーション解析手法の開発		・個体の放射線応答のモデル化 ・システム放射線生物学への展開 ・放射線発がんの動物実験、疫学研究との融合		・重粒子線がん治療の副作用低減とリスク評価 ・低線量率放射線の健康影響の解明 ・放射線防護の改革
変異誘発制御研究 ・特定の突然変異形質を高頻度に誘発させる外部因子の解明			・見出された因子を応用した新しい変異作出技術の開発		・目的とする変異体が容易に得られる育種技術体系の構築	
RI医療応用研究 ・At-211の大量かつ安定的な製造技術の開発		・がん細胞指向性薬剤へのAt-211導入技術の開発		・抗腫瘍効果の評価		・複合放射線治療RI薬剤とRI-DDSによる個別化医療の実現
植物RIイメージング研究 ・元素の選択的移行や生長・分配の変化の定量的な解析手法の開発			・多様な元素と植物の組み合わせに応じた生産性解析・評価手法の体系化		・「核農学」の確立、農業生産・環境保全技術の革新	

3

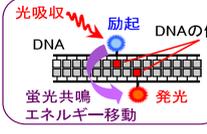
第3期中期計画において課題とすべき技術開発

○放射線作用の物理・化学・生物過程を解明する技術
TIARA、Co-60 γ線、放射光X線



集束式スキャン重イオンマイクロビームの実用化(安定化、高精度化)

- 重イオン・放射光X線マイクロビームによる細胞照準照射と素線量影響解析



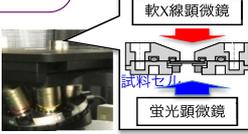
光吸収 → 励起 → DNAの傷 → DNAの修復
蛍光共鳴エネルギー移動 → 発光

- 難修復性DNA損傷の検出法
- 細胞への導入法



モデル生物: 線虫 (*C. elegans*)

- 線虫個体の細胞ネットワークの数理モデル構築
- 線虫局部への照準照射技術
- 線虫個体の放射線応答シミュレーション解析手法



ハイブリッド軟X線顕微鏡開発

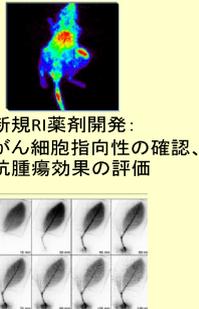
- 軟X線顕微鏡
- 試料セル
- 蛍光顕微鏡

○新規のRI製造・利用、計測・イメージング技術
TIARA、RIバイオトロン、東海タンデム、JRR-3、SPring-8

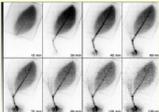


ターゲット調製
イオンビームを照射
RIが生産
化学的精製

イオンビーム照射による大量かつ安定的なRI製造・精製技術の開発



新規RI薬剤開発:
がん細胞指向性の確認、抗腫瘍効果の評価

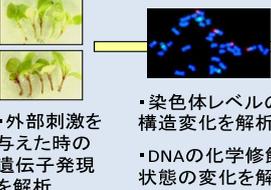


植物RIイメージング技術:
多様な元素の動態解析・解明

TIARAの重イオンビームの高エネルギー化、イオン種・照射ポート切り替えの迅速化

- 飛程増大→厚い生物試料の内部を照射
- 利用できるLET範囲の拡大
- ビーム利用効率の向上

○新しい突然変異体作出技術
TIARA、Co-60 γ線



外部刺激を与えた時の遺伝子発現を解析

染色体レベルの構造変化を解析
DNAの化学修飾状態の変化を解析



特定変異を高頻度に誘発する外部因子を利用した突然変異誘発技術

確立した育種技術は、施設供用制度等を通じて積極的に技術移転する

4

第3期中期計画で特に取り組むべき喫緊の課題

放射線の人体影響に関する2つの大きな未解決問題

1) 線質効果の原因

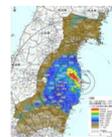
- ・なぜ重粒子線は、X線・ガンマ線よりがん治療効果が高いのか？
- ・健康リスクも高いのか？(有人宇宙飛行や重粒子線治療のリスク)
- ・微視的な初期エネルギー付与分布の違いによって生じる、**難修復性DNA損傷**が原因と言われているが、その実体は不明。



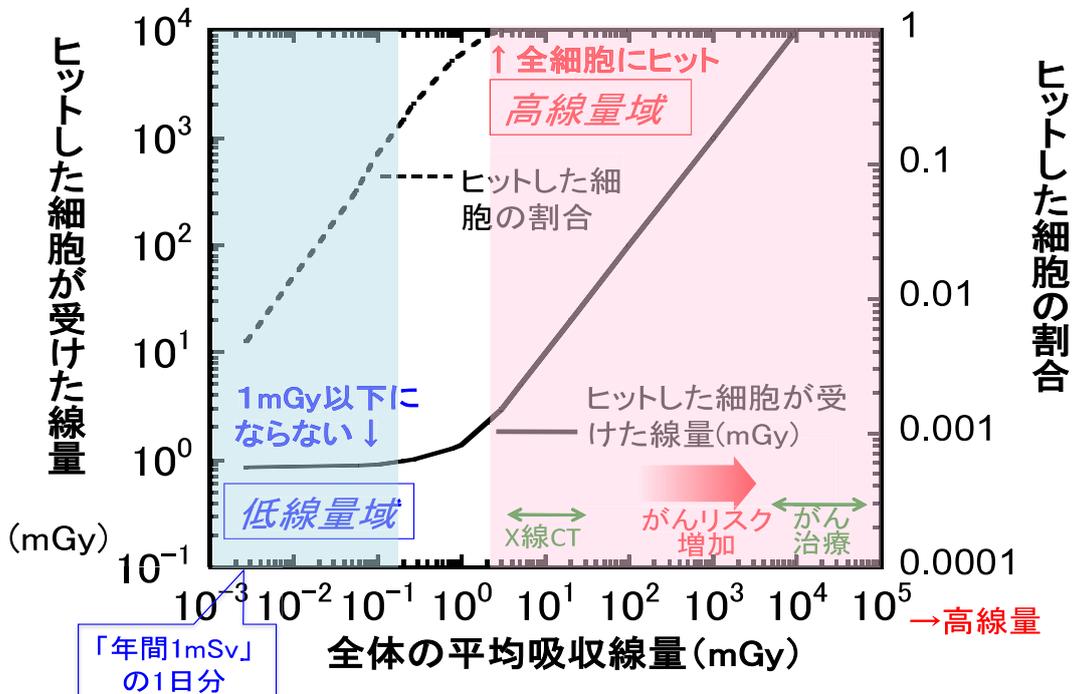
→多彩な照射施設と技術を駆使し、物理～生物過程の一貫した解明を目指す。

2) 低線量放射線の健康リスクの有無

- ・低線量(率)放射線の被ばくで本当にかんが増えるのか？
- ・LNTモデルは、高線量被ばくでの発がんリスクを直線的に外挿。
- ・がん年齢に達した高線量被ばく者の発がん増加のメカニズムは、
 - 1) 組織幹細胞に生じた**変異**が、**自然の多段階発がんのステップを1つ進める**
 - 2) 被ばくによる細胞死が、元からあった**がん幹細胞に増殖の機会を与える**
 - 3) 放射線ストレスで、免疫系など**個体レベルのがん抑制機能が低下する**
- ・放射線誘発というより、放射線が関与した**自然の発がん過程の促進**か。
- ・これらの1～3が、**低線量(率)被ばくでも実際に起こるのだろうか？**



・低線量(率)放射線の影響は、高線量(率)の影響の縮小版ではない！
 →ヒト培養細胞やモデル生物線虫等の実験データを積み上げ、**個体レベルの放射線ストレス応答のモデル化と、動物発がん実験や疫学研究との融合を目指す。**⑤



¹³⁷Cs- γ 線による全体の平均吸収線量、ヒットした細胞 ($\phi 8 \mu m$) の割合、および、ヒットした細胞における頻度平均線量 (Z_F) の関係

渡辺立子:放射線生物研究 47(4), 335-346 (2012) 低線量放射線の微視的エネルギー付与分布 図3を改変

⑥

福島復興に係る研究開発

放射性セシウムの植物移行抑制技術の開発

- 植物RIイメージング技術を用いて、生きたままのダイズ等の主要作物の体内でのセシウム移行をその場観察し、移行経路の解析を進める。
- イオンビーム育種によって得られたセシウム吸収能力に変化を生じたイネ候補株等を対象に、体内での移行に着目した解析を進める。

これまでの研究成果

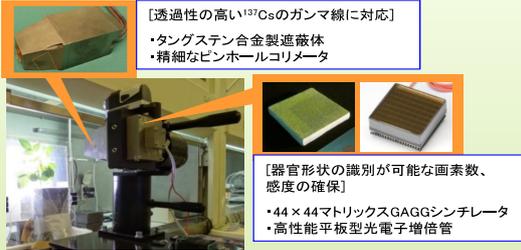
○ ¹³⁷Cs対応植物用ガンマカメラ技術の開発

[透過性の高い¹³⁷Csのガンマ線に対応]

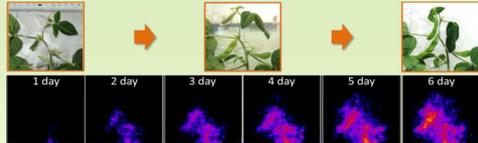
- ・タングステン合金製遮蔽体
- ・精細なピンホールコリメータ

[器官形状の識別が可能な画素数、感度の確保]

- ・44 × 44マトリックスGAGGシンチレータ
- ・高性能平板型光電子増倍管



・ダイズ子実への特異的な¹³⁷Cs集積を初めて観測



1 day 2 day 3 day 4 day 5 day 6 day

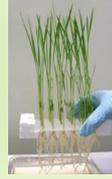
・水耕液に2 MBqの¹³⁷Csを投与し6.5日間連続撮影

○ セシウム高吸収/低吸収イネ候補株等の取得

				セシウム 吸収量 ($\mu\text{g}/\text{ポット}$)
ヒマワリ 11.6	ナタネ 8.2	シコクビエ 2.7	イネ < 0.5	

- ・イネ等にイオンビームを照射して作製した変異植物集団から、セシウム高吸収/低吸収変異候補個体を選抜
- ・イネ(コシヒカリ)では計462系統(約2,700個体)から高吸収候補を7個体、低吸収候補を10個体選抜
- ・飼料イネ(ふくひびき)では計約2,300個体から低吸収候補を13個体選抜(農研機構との共同研究)

水耕栽培によるイネの選抜



7

各研究テーマ説明資料

8

研究テーマ名：放射線生物作用解析研究(1) マイクロビーム細胞照射研究

研究のねらい

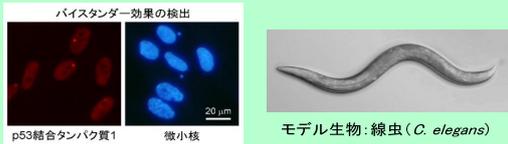
重イオンマイクロビーム細胞照準照射技術を開発し、細胞応答・生体応答ネットワークの解明と細胞集団全体および個体の生理機能全体における放射線ストレス応答の解明を目指す。

これまでの実績

- 重イオンマイクロビームを用いて細胞照射効果やバースタンダー効果の線質・線量依存性などを定量的に解析する手法を開発した。
- モデル生物：線虫の筋運動に関わる細胞ネットワークの数理モデルを構築した。

実施する研究開発

- 重イオン細胞照射効果とバースタンダー応答の分子機構を解明するため、**集束マイクロビーム**を用いた細胞照準照射技術や細胞集団の放射線応答のリアルタイム解析法などを開発する。
- 線虫個体へのマイクロビーム局部照射を用いて**個体レベル**の生体応答をシミュレーション解析する手法を開発する。



達成目標

- マイクロビームを用いた**個別の細胞と細胞集団全体**の放射線応答解析技術の確立
- 線虫への局部照射による**個体レベル**の放射線応答のシミュレーション技術の開発

最終的なアウトカム

- 重イオン照射効果の解明により、放射線治療、特に重粒子線治療の**副作用の低減**や**治療効果の向上**に貢献する。
- 細胞集団全体および個体レベルでの放射線ストレス応答をモデル化し、**システム放射線生物学**として展開する。
- 動物実験による発がん研究や疫学的研究と融合し、**低線量・低線量率放射線リスク**の解明に貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

- TIARA(高崎)：重イオンマイクロビーム、ブロードビーム
- コバルト60ガンマ線照射施設(高崎)

9

研究テーマ名：放射線生物作用解析研究(2) 放射場生体分子科学研究

研究のねらい

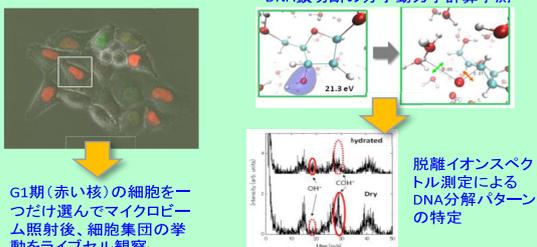
放射光X線を用いた細胞照射効果と生体分子損傷の解析法、及びライブセルイメージング技術を開発し、放射線に対する生体応答の分子機構と細胞動態の解明を目指す。

これまでの実績

- 元素選択的なイオン化に始まる新しいDNA損傷過程の発見とその分光的研究手法の開発。(2009、2012、2014年プレス発表)
- 細胞核内では損傷DNAから無傷のDNAへ影響が伝搬する現象を見出した。(2014年プレス発表)

実施する研究開発

- 照射細胞の時間応答を追跡するためのライブセルイメージング技術と解析法の開発を行う。
- 生体の放射線損傷応答を分光実験と理論の両面から調べる。



達成目標

- 個々の照射細胞を追跡するための、**ライブセルイメージング技術**とデータ解析法の確立
- 放射線生体分子応答機構を解明するための、**新しい放射光分光技術**の開発、**ミュオンスピンドロップ法**など新しい損傷DNA解析法の探索

最終的なアウトカム

- コヒーレントビーム(次世代放射光)の特徴を活かした新しい分光技術を開発し、分子レベル及び細胞レベルにおける放射線生体応答の初期過程を解明する。
- がんの放射線治療及び低線量リスク評価に資する基礎的知見を提供する。
- 分光とシステム放射線生物学を融合し、外乱に対する生物の非線形応答特性と頑強性の理解に基づく新しい放射線生物学を確立する。

高度化、利用する量子ビーム施設

- SPring-8 BL23SU, KEK-PF BL27, TIARA, J-PARC

10

研究テーマ名：放射線生物作用解析研究(3) 難修復性DNA損傷の生物影響解析

**研究の
ねらい**

放射線治療の革新等に貢献するため、細胞死や発がんの機構解明に向けた難修復性DNA損傷の細胞内導入法やハイブリッド軟X線顕微鏡装置の開発を目指す。

これまでの実績

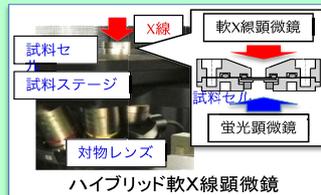
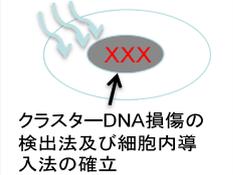
合成したDNA損傷を大腸菌内に導入して突然変異を測定する実験系を開発に成功し、クラスターDNA損傷の修復・変異を解析する技術を確立するとともに、生きている細胞をそのまま観察可能なレーザープラズマ軟X線顕微鏡を開発し、X線照射された細胞核の構造変化の解析を実現した。

実施する研究開発

電離放射線による細胞死やがん化の機構解明に向け、細胞内のクラスターDNA損傷の検出法やクラスターDNA損傷を細胞に導入する手法を開発する。

レーザープラズマ軟X線顕微鏡と蛍光顕微鏡を一体化したハイブリッド軟X線顕微鏡を開発する。

電離放射線



達成目標

- 電離放射線によって誘発される難修復性DNA損傷の検出手法及び難修復性DNA損傷の細胞への導入法の確立
- ハイブリッド軟X線顕微鏡装置を開発し、放射線誘発細胞死の機構の解析

最終的なアウトカム

- 放射線による細胞死の誘発機構の解明で、放射線がん治療の高度化に貢献
- 低線量放射線の正確なリスク評価に貢献
- 様々な生命現象を分子レベルの解像度で実時間三次元観察可能な超高速高解像度X線顕微鏡技術の確立で、生命科学に貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

TIARA(高崎量子応用研究所)、京大原子炉実験所Co-60、J-KAREN レーザー駆動イオンビーム(関西光科学研究所)、激光XII号(大阪大学レーザー研)、SPring-8(JASRI)

11

研究テーマ名：イオンビーム変異誘発制御研究

**研究の
ねらい**

イオンビーム誘発変異において特定の突然変異形質を高頻度に誘発させる因子を解明し、イオンビーム育種技術の精度を高め、次世代育種技術として発展させる。

これまでの実績

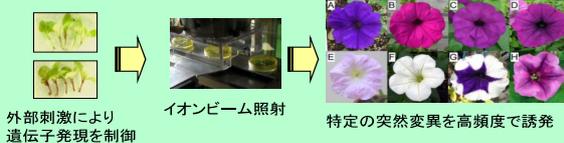
イオンビームを用いた有用微生物・植物資源の創成に資するため、微生物および植物における突然変異スペクトル解析技術をそれぞれ開発し、イオンビーム微生物育種技術を確立するとともに、植物におけるイオンビーム誘発変異を制御する技術の開発に成功した。

実施する研究開発

特定の突然変異形質を高頻度に誘発させる因子の解明に向けた研究を行う。

外部からの刺激により発現が変化する突然変異形質支配遺伝子を特定し、DNA修飾状態変化や染色体レベルの構造変化と量子ビームによる突然変異誘発頻度との関連性を解析・評価する。

得られた結果を応用し、新たな突然変異体作出技術の確立を目指す。



達成目標

- 特定の突然変異形質を高頻度に誘発させる因子の解明
- 特定変異を高頻度に誘発する因子を応用した、新たな突然変異体作出技術の確立

最終的なアウトカム

- 原子力機構の多彩な量子ビーム照射条件と進化するゲノムテクノロジーの融合
- ゲノム情報に基づいた、量子ビーム誘発変異と変異形質の関連の解明
- 特定の突然変異を高頻度で誘発させる技術を開発し、次世代高度育種技術として多様なニーズに対応した食料資源やバイオマス資源の開発の推進への寄与

高度化、利用する量子ビーム施設

TIARA、ガンマ線照射施設
確立したイオンビーム育種技術は、施設部のユーザーズオフィスを介して順次技術移転し、施設供用を促進する。

12

研究テーマ名： RIの医療応用に関する研究

**研究の
ねらい**

細胞殺傷能力の高いアルファ線を放出するアスタチン-211 (At-211)を使った新しいがんの内部放射線治療薬を開発し、アルファ線放出核種の有効性を示す。

これまでの実績

ポジトロン断層撮像装置 (PET) 用の放射性同位元素として期待が高い臭素-76 (Br-76) を使った新しいがんの診断薬を創り出すため、アミノ酸誘導体へのスズ-ハロゲン交換反応によるBr-76の直接的導入技術を開発し、体内分布に優れた2-⁷⁶Br-フェニルアラニンを合成し、新しいPET診断薬の開発に成功した。

実施する研究開発

アルファ線の短い飛行と高い細胞致死効果を活かし、アルファ線放出核種によるがんの内部放射線治療の有効性を示すため、At-211を大量かつ安定的に製造する照射・精製技術、体内での脱離が少なく多くのがん細胞に親和性を有する化合物への導入技術を開発し、得られたAt-211化合物の体内分布と抗腫瘍効果を動物実験で評価する。



達成目標

- At-211の大量・安定的な製造技術の開発
- がん細胞指向性化合物へのAt-211の導入法の開発
- 腫瘍モデルマウスを用いた抗腫瘍効果の評価によるアルファ線放出核種を用いた内部放射線治療の有効性の確認

最終的なアウトカム

- 放射線を利用する日本発の革新的ながん治療薬の創出
- 治療用RI薬剤の効果を最大限に発揮させるRI-DDSの完成と個別化医療の実現

高度化、利用する量子ビーム施設

TIARA、原科研タンデム加速器施設、JRR-3、SPring-8

13

研究テーマ名： 植物RIイメージング技術開発と農学応用研究

**研究の
ねらい**

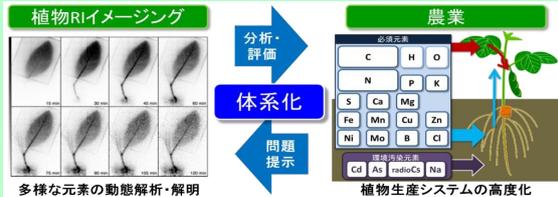
植物を対象としたRIイメージング技術を発展・体系化し、農業における植物生産システムの高度化に直接貢献する新規学術分野の基盤を形成する。

これまでの実績

ポジトロンイメージングを用いた多数の植物個体の光合成産物輸送を一括して計測する手法や経根吸収を直接計測する手法の開発、複数核種の同時計測が可能なコンプトンカメラの開発など、植物の栄養動態モデルの構築に有用なRIイメージング技術を開発した。

実施する研究開発

農業における植物生産システムの高度化に貢献するため、生産性を支配する要因のうち、植物体内での多様な元素の選択的移行、栽培条件による炭素分配の変化、土壌から植物根への物質移行などを解析・評価する手法を体系化し、生産性の「診断メニュー」を整備する。



達成目標

- 植物RIイメージング技術に基づく植物の生産性解析・評価手法の体系(メニュー)化
- 外部機関と連携した、植物の生産性を向上させる栽培条件の最適化研究に着手

最終的なアウトカム

- 農学の主要分野としての「核農学」を確立。
- 核農学の発展による農業技術の革新、植物の潜在的生産性を引き出す効率的な栽培技術や植物による環境保全技術の実現。

高度化、利用する量子ビーム施設

TIARA

農業現場における栽培条件を模擬するには、机上実験を前提とした「フード」ではなく、室内全体で非密封RI実験が可能な人工気象室 (RIバイオトロン) を設置することが非常に望ましい。ただし、そのためには施設建屋の排気能力の向上等が必要となる。

14

研究テーマ名：（福島復興）放射性セシウムの植物移行抑制技術の開発

**研究の
ねらい**

植物RIイメージング技術とイオンビーム育種技術を活用し、従来技術では達成困難な植物体内部における放射性セシウムの移行機構を解明し、移行抑制技術を開発する。

これまでの実績

- 植物体内の放射性セシウムの動態解析技術を確立し、セシウム高吸収植物候補株等の評価試験、ダイズにおけるセシウム移行動態の画像化と解析を行った。
- イオンビーム育種技術を用いて作出・選定したセシウム高吸収ヒエ等の試験圃場におけるセシウム収奪能力を評価した。

実施する研究開発

- 植物RIイメージング技術を用いて、生きたままのダイズ等の主要作物の体内でのセシウム移行をその場観察し、移行経路の解析を進める。
- イオンビーム育種によって得られたセシウム吸収能力に変化を生じたイネ候補株等を対象に、体内での移行に着目した解析を進める。

達成目標

- ダイズ、イネ、果樹等の主要作物における放射性セシウムの移行機構の解明および関与する遺伝子の特定によって、放射性セシウム移行抑制に向けた栽培条件や品種選抜条件を明らかにする。

最終的なアウトカム

作物や環境中の植物への放射性セシウム移行を抑制する施策の実施により、地域の農産物の消費者と地域住民の長期的な安心の確保、福島地域の環境回復と復興に貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

TIARA：農業現場における栽培条件を模擬するには、机上実験を前提とした「フード」ではなく、室内全体で非密封RI実験が可能な人工気象室（RIバイオトロン）を設置することが非常に望ましい。ただし、そのためには施設建屋の排気能力の向上等が必要となる。

資料10B-5

環境・産業応用量子ビーム技術研究の計画

前川 康成

①

第3期中期計画における環境・産業応用量子ビーム技術研究

概要 「クリーンで経済的なエネルギーシステム」に資する革新的発電・エネルギー貯蔵技術、革新的電子デバイスや「健康長寿社会」に資する再生医療デバイスや国産資源回収技術を実現するため、イオンビーム、電子・γ線、陽電子など量子ビームの発生・制御及び利用技術を高度化する。

先端材料創製に向けたビーム発生・制御及び利用技術の高度化

燃料電池用高機能高分子膜
⇒量子ビーム複合利用による
合成・解析技術

空気電池等用非貴金属触媒
⇒電子・イオンビームを用いた
触媒材料の微細構造形成
技術

半導体スピン・フォトン情報の
制御
⇒電子・イオンビームによる
単一フォトン源形成技術

最表面スピン情報の計測
⇒スピン偏極陽電子ビーム
技術

再生医療用細胞培養
マトリックス材料
⇒生体適合材料のイオン
ビーム微細加工技術

高性能金属捕集材
⇒レアメタルの吸脱着能
を制御する電子線グラ
フト重合技術

革新的発電・エネル
ギー貯蔵技術

革新的電子デバイスによ
るエネルギー効率向上

再生医療デバイス・
国産資源回収

「クリーンで経済的なエネルギーシステム」 「国際社会の先駆けとなる健康長寿社会」
「国産鉱物資源の安定供給確保」

科学技術イノベーション総合戦略 / エネルギー基本計画 (2014) ②

第3期中期計画における環境・産業応用量子ビーム技術研究のロードマップ

	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2025	2025-2035
蔵技術研究 発電・エネルギー貯	電子、イオンビーム、 γ 照射技術の開発 ・高性能電池膜合成 ・非貴金属触媒の微細構造形成		・電池作動環境下、ビーム複合的・相補的利用解析 ・モデル薄膜材料作製用イオン注入法の確立		・燃料電池実用性能の実証 ・空気電池性能の確認	量子ビーム製造技術開発 ・燃料電池 ・リチウム空気電池	・クリーンで経済的なエネルギーシステム用先端材料創製技術の確立
測技術研究 スピン情報制御・計	・単一フォトン源形成プロセス検討 ・スピン偏極ポジトロニウム飛行時間計測法		・デバイスの作製プロセス検討 ・高強度スピン偏極陽電子源の開発		デバイス基本構造評価 表面スピン情報の解析	スピントロニクス ・デバイス開発 ・高精度表面解析	・量子コンピューティングによるエネルギー消費量の大幅な削減
材料研究 再生医療用	・生体適合材料の表面微細加工・改質技術の開発		・材料内部微細構造制御技術の開発 ・細胞培養用マトリックス材料特性制御				・健康長寿社会に資する細胞培養材料の量子ビーム構造・機能制御技術の確立
	・ポジトロン照射施設の検討及び設計・要素技術開発					・ポジトロン照射施設建設	

3

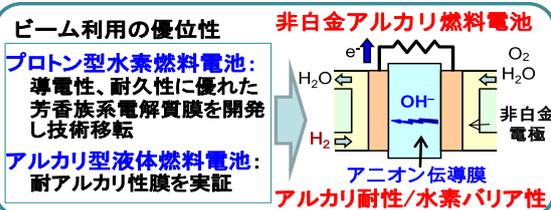
第3期中期計画において課題とすべき技術開発(1)

革新的発電・エネルギー貯蔵技術

燃料電池用高機能高分子膜

⇒量子ビーム複合利用技術

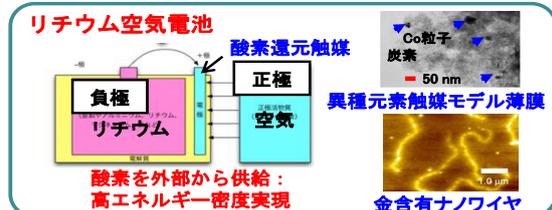
- 高温アルカリ耐性、水素バリア性に優れたアニオン電解質膜、イオノマー創製のための量子ビーム複合利用技術を開発
- アルカリ水素燃料電池の実用性能を実証



空気電池等用非貴金属触媒

⇒触媒の微細構造形成技術

- 電子・イオンビームを用いた酸素還元性微細構造を形成する技術の確立
- 空気電池等に適用できる非貴金属の酸素還元触媒としての性能確認



ビーム相補的・複合的利用

中性子・放射光、陽電子の複合的・相補的利用
：燃料電池膜の階層構造・機能の関係を解明

放射光(XAFS), TIARA(PIXE, RBS)複合利用
：酸素還元活性が発現する活性サイトを解明

燃料電池自動車の本格普及に資する、非白金アルカリ水素燃料電池の開発

リチウム空気電池、燃料電池共通の酸素極触媒の非貴金属化

革新的発電・エネルギー貯蔵材料により、「クリーンで経済的なエネルギーシステムを実現」

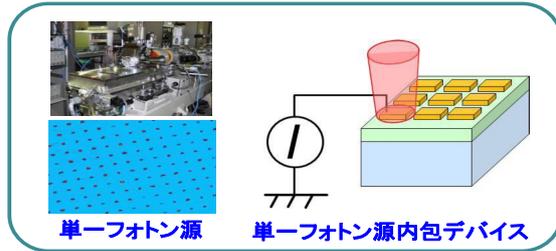
4

第3期中期計画において課題とすべき技術開発(2)

革新的電子デバイスによるエネルギー効率向上

半導体スピン・フォトン情報制御
⇒ 単一フォトン源形成技術

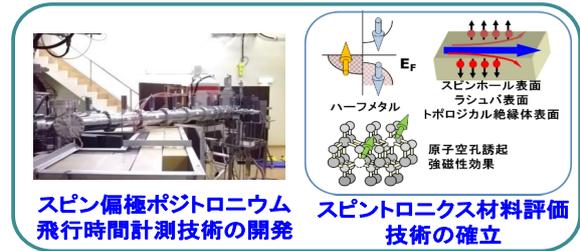
- 電子・イオンビームによる高精度に位置制御した単一フォトン源の効率的作製技術を確立し、単一フォトン源の発光・スピンの特性を解明
- 光プロセスなどを組み合わせることで、単一フォトン源を埋め込んだ発光、スピンデバイスを製作



ビーム利用技術の高度化

最表面スピン情報の計測
⇒ スピン偏極陽電子ビーム技術

- スピン偏極陽電子ビームの高強度化を図るとともに、新技術としてスピン偏極ポジトロニウム飛行時間計測技術を開発
- スピンホール表面、ラッシュバ表面、トポロジカル絶縁体などのスピントロニクス材料の表面解析の実証



ビーム発生・制御技術の高度化

量子コンピューティングや量子スピントロニクスデバイスの実現により、エネルギー消費量の大幅な削減や、革新的デバイスによる新市場の創出

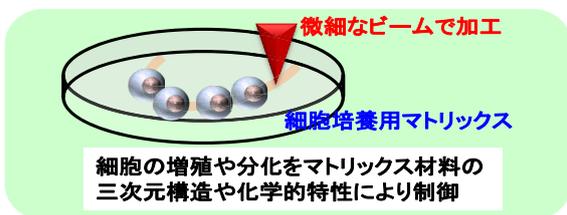
5

第3期中期計画において課題とすべき技術開発(3)

再生医療デバイス・国産資源回収

細胞培養マトリクス材料
⇒ 生体適合材料の微細加工

- 量子ビームや光プロセスなどを組み合わせた生体適合性材料の表面及び内部の微細加工・改質技術の確立
- 再生医療に資する細胞培養加工用マトリクス材料の細胞接着・増殖性の制御



構造・機能解析

- ・マトリクス材料内部・表面
- ・細胞/マトリクス界面

ビーム相補的・複合的利用

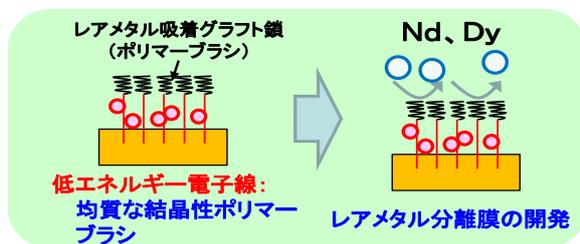
中性子 (SANS)
放射光 (SAXS, XAFS)

構造・反応解析

- ・グラフトポリマーブラシ
- ・レアメタル吸着サイト

高性能金属捕集材
⇒ 電子線グラフト重合技術

- 金属捕集材のレアメタル吸脱着能を制御する電子線グラフト重合技術の開発
- ネオジウム (Nd)、ディスプロシウム (Dy) 用捕集材及び回収システムの開発



- ・iPS細胞等からの人工臓器培養手法の確立
- ・再生医療による健康長寿社会の実現に貢献

- ・金属資源リサイクル・備蓄体制の確立
- ・国産鉱物資源の安定供給確保

6

ビームの相補的・複合的利用と最先端解析機器群の活用

創製技術

先端材料創製

- 空気電池用非貴金属触媒
- 燃料電池用高機能膜
- スピントロニクスデバイス
- 再生医療細胞培養材料
- 高性能金属捕集材

○ 3D微細加工
○ 表面ナノ加工
○ クラスタービーム

コバルト60



電子線加速器



- 異種原子導入
- 表面機能化
- イオン穿孔
- ナノワイヤ
- 欠陥制御

○ 大面積・均一照射
○ 環境制御照射

相補的・複合的利用

放射光

○ XAFS
○ XPS
○ USAXS



中性子

○ OSANS
○ USANS
○ NR



高度な解析を実現

解析技術

イオンビーム (TIARA)

○ OPIXE ○ RBIS

最先端解析技術

高度なイオン照射技術による材料・資源創出と構造・機能・元素分布解析

○ スピントロニクスデバイス評価
⇒ **スピン偏極陽電子ビーム**

最先端解析機器群の活用

新奇材料創製 (H24補正)
実環境でナノ～ミクロンの内部・表面構造を解明

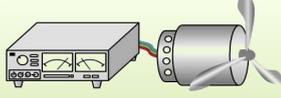
XPS	触媒材料 (触媒組成)、燃料電池 (界面組成)
顕微ラマン	燃料電池、細胞培養材料 (内部化学構造)
TEM	触媒材料、燃料電池 (触媒サイズ、表面形状)
AFM	触媒材料、細胞培養材料 (表面構造・機能)
SAXS	燃料電池、金属捕集材 (高次構造、結晶構造)
X線CT	細胞培養材料、金属捕集材 (内部構造)
ESR	細胞培養材料、金属捕集材 (反応機構)
光誘起蛍光分析	スピントロニクス (単一フォトン源構造、分布)

先端材料創製に適した複合的・相補的ビーム利用技術を外部ユーザーに提供 7

福島復興に係る研究開発

原子力用耐放射線性ロボットの要素技術開発に関する研究

- 高温高湿、高線量率放射線場で使用する半導体デバイスや電子回路の耐放射線性評価技術を開発
- 耐放射線性電子回路を実装したアクチュエータを作製し、東電福島第一原発の廃炉作業で使用するロボットに適用

耐放射線性回路の開発 アクチュエータの耐放射線性を検証

放射性物質除染除去物の減容化に関する研究

- 除染除去された植物残渣から抽出されたセシウム等の放射性物質を、グラフト捕集材で濃縮する技術により、焼却と同等以上の減容率を実現 (焼却以外の技術確立)
- 除去物一時保管場所中の有機系残渣滲出水からの放射性物質除去技術及び農業用水の保全技術を確立 (福島県内町村からの要請)

水・放射線環境下における高分子材料の劣化評価技術の開発

- 水・放射線環境下における、高分子材料の劣化評価技術の開発により、放射線劣化挙動のデータベース化を実現
- 福島第一原発の汚染水処理・貯蔵や燃料デブリ取り出し作業に貢献

8

補足説明資料

9

研究テーマ名 発電デバイス用先端電解質膜創製に向けたビーム複合利用技術の開発

研究のねらい

非白金アルカリ水素燃料電池用高分子膜材料創製を目的に、量子ビームの複合的・相補的利用により、幅広い空間スケールで材料構造・機能を制御・解析する技術を開発する。

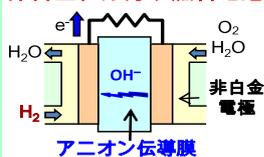
これまでの実績

電子・ γ 照射を利用したブロックグラフト重合技術によるイオン伝導パスの制御により、導電性、耐久性に優れた芳香族炭化水素電解質膜を開発し技術移転した。また、外部資金を活用して、非白金液体燃料電池用膜のアルカリ耐性を実現した。

実施する研究開発

高温アルカリ耐性、水素バリア性に優れたアニオン電解質膜を合成するため、結晶構造とイオン伝導パスを幅広い空間スケールで制御する照射・重合手法を研究する。更に、電池作動環境での中性子・X線小角散乱、ポジトロンによる複合的膜構造解析を実施する。

非白金アルカリ燃料電池



創製技術

イオン
電子線
 γ 線
アルカリ耐性
水素バリア性

解析技術

中性子
放射光
陽電子
階層構造・
機能解明

複合的

達成目標

- ・高性能アニオン電解質膜、イオノマーを合成するビーム創製技術を確立
- ・作動環境で幅広い空間スケールの膜構造が解明できる量子ビーム複合解析技術を開発
- ・非白金アルカリ燃料電池の実用性能を実証

最終的なアウトカム

- ・燃料電池自動車の本格普及に資する、非白金アルカリ水素燃料電池の実現
- ・非白金、水素利用によりクリーンで経済的なエネルギーシステムの実現に貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・電子線加速器、TIARA
→ 均一照射ビームラインの整備
- ・SPring-8-X線超小角散乱、高崎-X線小角散乱
- ・J-PARC、中性子小角散乱装置(環境制御)
→ 環境制御測定の実備

10

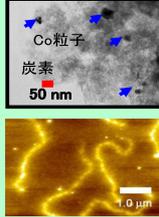
研究テーマ名 量子ビームを用いた非貴金属触媒の微細構造形成技術の創出

**研究の
ねらい**

空気電池等の発電・蓄電デバイスに必要な白金に代わる先端触媒材料の創製を目指し、酸素還元活性が発現する微細構造を制御性良く形成できるイオン照射・電子線照射技術の創出を行う。

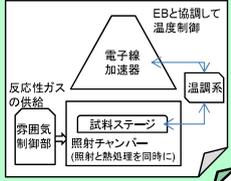
これまでの実績

- ・レーザー蒸着により形成したカーボンアロイで酸素還元活性の発現を確認。
- ・単一粒子ナノ加工技術により金ナノ粒子を内包したナノワイヤを形成。



実施する研究開発

- ・酸素還元触媒の活性の向上を目的に、繊維、ナノワイヤ形状の前駆体高分子材料へ異種元素を導入するための電子線照射・焼結技術を創出するとともに、イオン注入等により異種元素を添加した触媒モデル薄膜を作製し、酸素還元活性が発現する構造・化学結合状態を解明する。
- ・非貴金属の酸素還元触媒を用いた電極材料を作製し、空気電池等での発電性能を評価する。



達成目標

- ・非貴金属触媒材料の実用化に向けた基礎技術の確立を目指し、電子・イオンビームを用いた酸素還元性微細構造を形成する技術を開発
- ・空気電池等に適用できる非貴金属の酸素還元触媒としての性能確認

最終的なアウトカム

- ・空気電池、燃料電池の触媒を非貴金属化した革新的発電デバイスの実現
- ・非白金、水素利用によりクリーンで経済的なエネルギーシステムの実現に貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・電子線加速器 → 雰囲気・温度同時制御電子線照射技術の構築
- ・静電加速器 → 低真空下イオン注入装置の整備
- ・イオン導入型TEM → 低真空下その場観察装置の整備
- ・TIARAサイクロトロン → 大気雰囲気下高LETイオンビーム照射技術
- ・SPring-8(XAFS) → 活性サイトの化学結合状態解析
- ・JRR3 (中性子小角散乱) : 微細構造の評価

11

研究テーマ名 量子ビームによる単一フォトン源形成技術の研究開発

**研究の
ねらい**

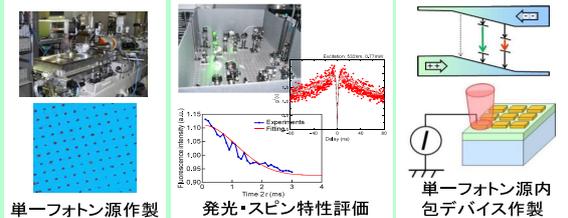
量子スピントロニクスの実現に向けて、量子ビームを活用することで、ワイドバンドギャップ半導体中へ単一フォトン源となる欠陥を効率的、且つ、位置制御して形成する技術を開発する。

これまでの実績

- ・炭化ケイ素(SiC)半導体の照射効果解明と耐性強化技術の開発(第1期中期計画:トータルドーズ耐性、第2期中期計画:シングルイベント耐性)
- ・宇宙用半導体(太陽電池・デバイス)の劣化・誤動作を評価
- ・ダイヤモンド中の単一フォトン源である窒素-空孔(NV)欠陥形成、高性能化に関する研究に着手

実施する研究開発

ワイドバンドギャップ半導体中への単一フォトン源の効率的な作製技術を開発し、単一フォトン源の発光やスピン特性を明らかにする。また、光プロセスなどを組み合わせることで、単一フォトン源を位置制御して半導体デバイス内に形成する技術を開発。



達成目標

- ・効率的且つ数百nm程度の位置制御した単一フォトン源の生成技術の確立
- ・半導体デバイス内に単一フォトン源を埋め込むデバイス作製プロセスを開発

最終的なアウトカム

- ・単一フォトン源を効率的に、数十nm間隔で配置する技術を確立(20年後)
- ・量子コンピューティングやナノフォトニクスを実現し、革新的デバイスによる新市場の創出や、情報処理・通信やセンシング技術の革新的な向上に資する(30年後)
- ・エネルギー消費量の大幅な削減を実現

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・原子力機構: TIARA (3MVタンDEM加速器、400kVイオン注入器、低エネルギー加速器)、電子線加速器 → イオン注入と電子線による欠陥生成を組み合わせた高精度・高効率欠陥形成技術を開発
- ・他機関: 低エネルギーシングルイオン注入器(早稲田大学など)

12

研究テーマ名 最表面スピン計測に資するスピン偏極陽電子ビーム技術の研究

**研究の
ねらい**

高速・省電力スピントロニクスデバイス開発に資する、低損失スピントロニクスデバイス評価のための新規的なスピン偏極陽電子ビームの発生・制御・利用技術を開発する。

これまでの実績

サイクロトロンを用いて製造した⁶⁸Ge陽電子線源により、現行で世界最高のスピン偏極率を持つ陽電子ビームの開発に成功した。これを用いて、4d及び5d遷移金属の最表面における電流誘起スピン蓄積効果の観測に世界で初めて成功した。

実施する研究開発

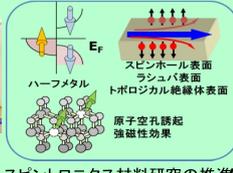
スピン偏極陽電子ビームの高強度化を図るとともに、新技術としてスピン偏極ポジトリウム飛行時間計測技術を開発する。これを用いて、スピンホール表面、ラシュバ表面、トポロジカル絶縁体表面、ハーフメタル表面におけるスピン蓄積効果を詳細に解明する。



68-Ge線源の高強度化



スピン偏極ポジトリウム飛行時間計測技術の開発



スピントロニクス材料研究の推進

達成目標

- ・⁶⁸Ge陽電子線源の高強度化
- ・スピン偏極ポジトリウム飛行時間計測の技術開発
- ・スピントロニクス材料表面解析の実証

最終的なアウトカム

- ・新規スピントロニクス材料、量子コンピュータ評価手法の確立により、エネルギー消費量の大幅な削減や、革新的デバイスによる新市場の創出

高度化、利用する量子ビーム施設

- JAEAスピン偏極陽電子ビーム装置
→ ポジトリウム寿命計測, 飛行時間計測
- TIARAサイクロトロン
→ 金属Gaターゲットによる陽電子ビーム増強
- KEK低速陽電子実験施設
→ レーザー逆コンプトン法によるスピン偏極ビーム発生を検討

13

研究テーマ名 量子ビームを駆使した生体適合材料の微細加工技術の研究開発

**研究の
ねらい**

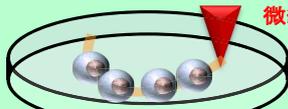
細胞培養加工用マトリクス材料創製のため、量子ビームを駆使した生体適合材料の表面及び内部微細構造の制御技術を開発する。

これまでの実績

放射線橋かけにより作製した天然高分子ゲルに毒性の低いモノマーを検出剤として添加した放射線治療線量(1~10 Gy)の空間分布計測可能なゲル線量計材料を開発した。

実施する研究開発

- ・生体適合性材料の表面及び内部の微細加工、改質、評価が可能なイオン、電子、中性子など量子ビーム利用技術の高度化
- ・毒性を有する薬剤を用いない、3次元構造や化学特性を制御した、新たな細胞培養加工用マトリクス材料創製技術の開発
- ・細胞接着・増殖性制御に適した材料の構造や化学特性に関する基礎的知見の取得



細胞培養用マトリクス

細胞の増殖や分化をマトリクス材料の三次元構造や化学的特性により制御

達成目標

- ・生体適合性材料の表面及び内部微細構造を制御する量子ビーム利用技術の確立
- ・細胞培養加工用マトリクス材料の細胞接着・増殖性の制御技術の開発

最終的なアウトカム

成体幹細胞、ES細胞、iPS細胞などを用いた細胞接着や増殖性に関する基礎研究、臨床研究を実施し、機能性デバイスの実用化技術を確立することで、再生医療による健康長寿社会の実現に貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・TIARA → イオンビームによる微細加工
- ・電子線照射施設、ガンマ線照射施設
→ 微細加工、表面化学特性制御
- ・J-PARC、SPring-8
→ 中性子、X線の相補的利用で、実環境での細胞・マトリクス構造解析

14

研究テーマ名 量子ビームを活用した高性能金属捕集材の創製技術の研究開発

**研究の
ねらい**

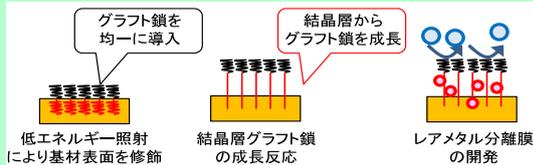
国産鉱物資源の安定供給確保を目指し、電子線グラフト重合技術によって高性能金属捕集材のレアメタルの吸脱着能を制御する技術を開発する。

これまでの実績

グラフト重合により導入する吸着官能基を、触媒作用を発現させる反応場として活用し、バイオディーゼル生成用触媒を開発した。また、これらの知見を結集し、福島復興のための除染材料を早期に開発し、水の安心を担う給水器の販売に繋がった。

実施する研究開発

ディスプレイウム(Dy)等の難吸着メタルを効率的に吸脱着可能なグラフトブラシを創出するため、量子ビームの相補的利用によりブラシ構造を解明するとともに、均質ブラシ長を高密度に導入可能な電子線照射技術进行研究する。また、基材及びグラフトブラシ内の結晶層を制御、抑制可能な照射技術を検討する。



達成目標

- ・レアメタル吸脱着能を制御する電子線グラフト重合技術の開発
- ・レアメタル(Dy、Nd)捕集材及び回収プロセスの開発

最終的なアウトカム

- ・金属資源リサイクルプロセスの確立(～10年後)
- ・鉱物資源の安定供給確保に不可欠なリサイクル・備蓄体制の実現(～15年後)
- ・応用展開: ブラシを触媒とする創薬技術(～30年後)

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・電子線およびガンマ線照射施設
→ グラフトブラシ制御技術開発
- ・SPring-8 X線超小角散乱、X線小角散乱装置
→ リアルタイム反応(吸着)挙動の解明
- ・TIARA PIXE → 材料中の元素分布解析
- ・J-PARC 中性子小角散乱装置
→ グラフトブラシ吸着金属の錯体構造の解明

15

研究テーマ名 放射性物質除染除去物の減容化に関する研究

**研究の
ねらい**

放射性廃棄物の減容化に貢献するため、植物残渣等有機系放射性廃棄物から放射性物質を抽出可能な技術を開発する。

これまでの実績

- ・植物残渣のモデル物質であるひまわりの搾油滓からのセシウムを含む抽出液中から、セシウムを捕捉可能なグラフト捕集材を開発した。
- ・フミン酸含有腐植液中に溶存する可溶性セシウムを、放射性物質汚染対処特別措置法で定めた濃度限度(約80Bq/L)以下に除去できることを実証した。

実施する研究開発

- ・除染除去された植物残渣物から、セシウム等の放射性物質の抽出条件最適化と、抽出液中のセシウム等を濃集可能なグラフト捕集技術を組み合わせ、焼却と同等以上の減容率が可能なプロセスを開発する。
- ・有機系除染除去物の葉土肥料等への資源化技術を開発する。
- ・一時保管場所の有機系残渣滲出水からの放射性物質除去技術を確立する。

達成目標

- ・焼却法と同等の減容化率を達成可能な技術開発
- ・植物残渣等有機物からの放射性物質抽出装置の試作
- ・抽出後残渣の葉土肥料等の適応評価

最終的なアウトカム

- ・有機系放射性廃棄物の減容化技術及びシステムの提供
- ・有機系除染除去物の資源化技術の提供
- ・放射性物質除去技術による農業用水の保全技術の確立

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・電子加速器
- ・コバルト60ガンマ線照射施設

16

研究テーマ名 原子力用耐放射線性ロボットの要素技術開発に関する研究

**研究の
ねらい**

MGyレベルの耐放射線性を有する電子回路及びその回路を実装した耐放射線性ロボット要素技術(アクチュエータ)を開発する。

これまでの実績

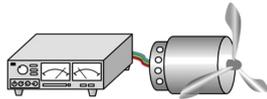
- ・10MGyのトータルドーズ耐性を有する炭化ケイ素(SiC)半導体デバイスの開発(第1期中期計画)
- ・SiC半導体デバイスのシングルイベント耐性強化技術の開発(第2期中期計画)
- ・宇宙用太陽電池や半導体デバイスの劣化・誤動作を評価する技術を開発

実施する研究開発

- ・高温・高湿下の放射線場といった複合環境下で半導体デバイスや回路の耐性を評価する技術を開発する。
- ・耐放射線性SiCデバイスを含む電子回路及びその回路を実装したロボット要素(アクチュエータ)を作製し、複合環境下評価技術を用いて、それらの耐放射線性を検証する。



耐放射線性回路の開発



アクチュエータの耐放射線性を検証

達成目標

- ・MGyレベルの耐放射線性を有する電子回路の開発
- ・開発した電子回路を実装したアクチュエータのMGyレベルでの放射線耐性の実証

最終的なアウトカム

- ・東電福島第一原発の廃炉作業(デブリ取出し等)で使用する超耐放射線性ロボットの開発
- ・超耐放射線性エレクトロニクスの実現による、原子力施設や大型加速器施設、核融合施設の信頼性向上
- ・複合環境でも高信頼性な機器開発による他分野(宇宙、航空、電鉄等)への貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

- ガンマ線照射施設、電子線加速器
- ・温度、湿度や雰囲気等を制御した環境での放射線照射技術を開発

17

研究テーマ名 水・放射線環境下における高分子材料の劣化評価試験技術の開発

**研究の
ねらい**

福島第一原発の安全・確実な廃止措置に貢献するため、水・放射線環境下における高分子材料の劣化評価試験技術を開発するとともに、防水材等に使用される高分子材料の放射線劣化挙動データをまとめ、データベース化・公開する。

これまでの実績

- ・学術論文等の資料を基に「高分子系材料・機器の耐放射線性データベース」を構築、公開した。
- ・安全研究・防災支援部門と協力し、原子力安全・保安院(現 原子力規制庁)「高経年化対策強化基盤整備事業」においてケーブル絶縁材料の放射線劣化に及ぼす添加剤の影響を解明した。

実施する研究開発

- ・安全研究・防災支援部門や福島研究開発部門等と連携し、防水材等に使用される高分子材料(ポリエチレン、ウレタン樹脂、エポキシ樹脂等)について、水中での放射線照射を実施可能な照射技術を開発する。
- ・高分子材料の劣化挙動とその要因を解明するとともに、適切な放射線照射条件と劣化指標を決定し、評価試験技術を確立する。

達成目標

- ・水・放射線環境下における高分子材料の劣化評価試験技術の開発
- ・種々の高分子材料について、水中での放射線劣化挙動に関するデータベースの公開

最終的なアウトカム

- ・2020年頃から開始が予定されている燃料デブリ取り出し作業や汚染水の処理・貯蔵に関する材料選定および使用される材料・機器の健全性評価

高度化、利用する量子ビーム施設

- ・水中で高分子材料にガンマ照射を行なう照射設備を整備する。

18

資料10B-6

荷電粒子・RI利用技術開発の計画

小嶋 拓治

1

第3期中期計画における荷電粒子・RI利用技術開発

概要 先端研究プラットフォームの一翼を担いユーザーの多様な要求に応える放射線高度利用施設として、ビーム生成、加速、制御、計測、及び照射に係る技術を開発し、我が国の科学技術イノベーションに貢献する。

ビーム生成・加速・制御技術

ビーム形状制御・安定化

マイクロビーム
直径 $\sim 1\ \mu\text{m}$

大面積均一
ビーム

シングル
パルス化

間隔 $= 1\ \mu\text{s} \sim \infty$

低線量放射線
生物影響の解明



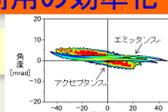
水の放射線
分解反応
機構の解明

イオン穿孔フィル
タの製造

照射効果深さ
(飛程)の制御

ビーム利用の効率化

加速効率
の向上



重イオンクラスタービーム

新規分析

GeV級重イオンビーム

小型加速器の設計・製作

ビームの迅速切替
運転の自動化

計測・照射技術

ビーム(放射線)計測・検出

エネルギー弁別計測・位置検出

医学生物学用

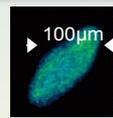
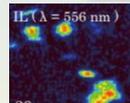
小型コンプトンカメラの開発

リアルタイムモニタ・その場測定

シングルイオン検出

ビーム利用の高感度化・高空間分解能化

マイクロビーム形成・描画



微粒子表面の化合
物同定 (ILMIS)

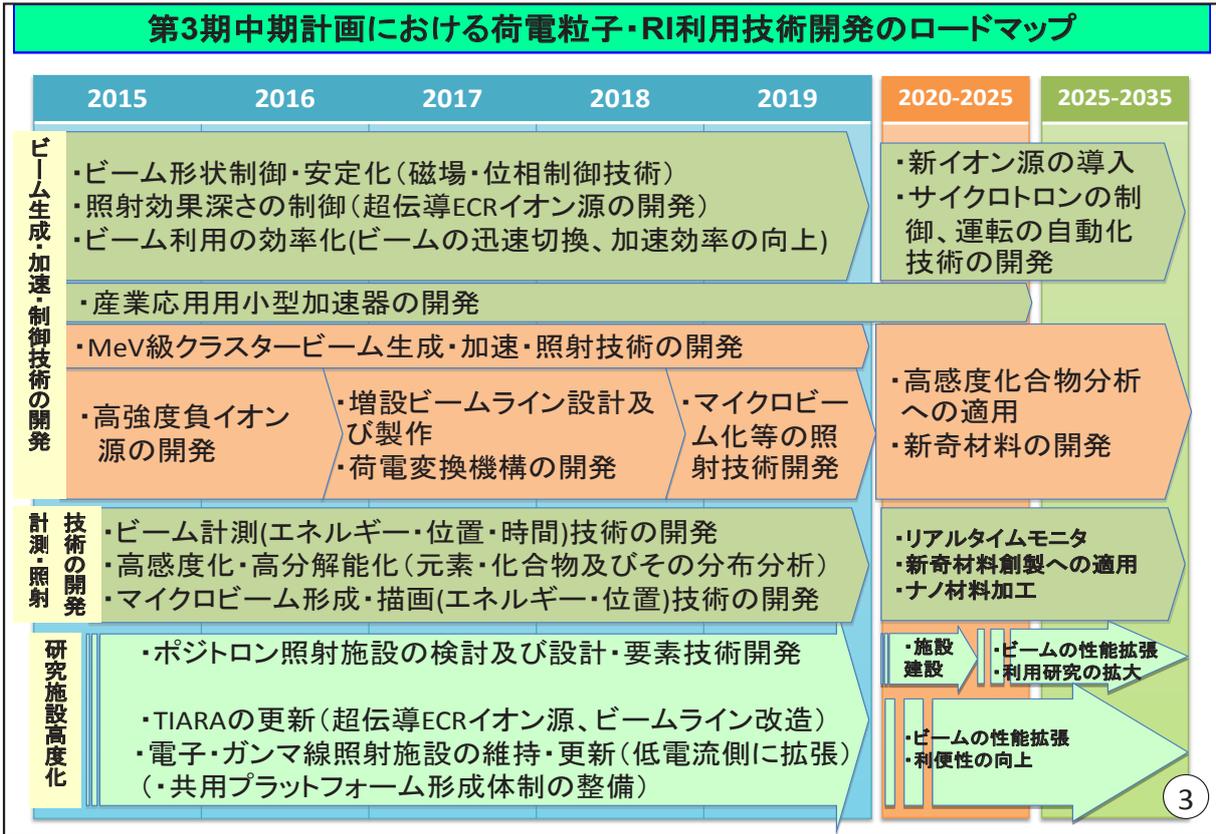
3次元マイクロ
PIXE/PIGE分析

3次元微細加工

ニーズへの対応 + シーズ技術の提供

ユーザー要求の発掘、先端技術の提案、先進量子ビーム応用研究の範囲拡大
技術開発成果の実用化

2



ビームの相補的・複合的利用と最先端解析機器群の活用

目的：荷電粒子・RI利用技術等の高度化を図るとともに、この利用技術を産官学の利用に供することにより、我が国の科学技術イノベーション創出に貢献する。

先端材料創製、バイオ技術研究に向けたビーム技術・利用技術の高度化

荷電粒子等を駆使して創製する先端材料・新遺伝資源

- 空気電池等の発電・蓄電デバイス材料
- 量子コンピュータ等のスピントロニクスデバイス
- 細胞培養加工用の再生医療デバイス
- 新形、新色の花卉等の改良品種
- ゲノム情報を活用した遺伝資源等

▶ 先端ビーム利用技術開発・推進

▶ 分析評価技術の高度化

▶ 培養、栽培試験法の確立

▶ 施設の利便性向上

最先端照射施設/解析機器群

先端材料開発、放射線育種、材料特性分析に向けた産学官連携の推進

研究所・大学等

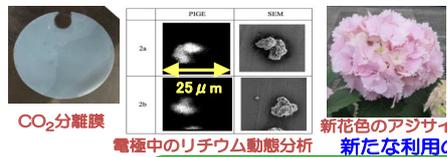
▶ ユーザーズオフィスの開設

▶ 分析評価・試験の技術的支援

▶ 成果普及・コミュニティ形成

▶ 専門技術者の育成等

民間・企業等



CO₂分離膜
電極中のリチウム動態分析

新花色のアジサイ
新たな利用の開拓

我が国における科学技術イノベーション創出の促進

革新的発電システムや革新的デバイス開発、身体・臓器機能を代替・補完する再生医療デバイス開発、ゲノム情報を活用した農林水産技術の高度化

全国の関連研究施設・装置について、仕様、利用環境、利用目的などの情報ネットワークの構築と、リエゾン的キーパーソンによる利用施設ナビゲーション体制の整備

福島復興に係る研究開発における高崎研施設の利用・支援 (H26を例示) 6

イオン照射研究施設(TIARA) サイクロトロン6/53件 静電加速器 4/38件(複合利用3件)

- 廃止措置でロボット等に使用される半導体デバイスの耐放射線性評価/開発(量子ビーム高崎)
- 環境及び植物におけるRI動態解析(量子ビーム高崎)
- 突然変異に基づく放射性セシウム濃縮菌の創出(量子ビーム高崎)
- MOX燃料模擬材料の安全性研究(原子力基礎工)

電子線照射施設 4/20件(ガンマ線との複合利用3件)

- 低濃度セシウム吸着材の開発(量子ビーム高崎)
- 多核種除去設備(ALPS)の汚染水処理システム廃棄物への電子線照射試験(核燃料サ)
- セメント系固化材からの水素発生挙動研究(バックエンド)
- 原子力水化学(高エネルギー照射場の非均質現象)研究(安全研究セ)

ガンマ線照射施設 13/34件

- 放射性セシウム濃縮菌等の突然変異研究(量子ビーム高崎)
- 廃吸着材、スラッジ等の保管容器の健全性評価(福島技、バックエンド他)
- 海水中での使用済燃料保管プール材の耐久性研究(原子力基礎工、原科研福島)
- Cs/Sr吸着材の安定性(再処理技術セ)
- 耐放射線性カメラ、LED照明器具等の開発(大洗研究開発セ)

各研究テーマ説明資料

7

研究テーマ名 多様な量子ビーム施設・設備の整備とビーム技術の研究開発

研究のねらい 荷電粒子・RI利用研究に資するため、TIARAにおけるビーム生成・加速・制御技術等の開発を行う。

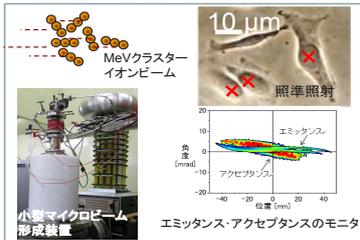
これまでの実績

サイクロトロンでは、世界最小径の高エネルギーイオンマイクロビームの形成技術(第1期)、多重極磁場を用いた大面積均一ビーム照射場の形成技術(第2期)を開発し、材料・バイオ技術における量子ビーム応用研究の推進に貢献した。また、静電加速器群では、第3期中期計画の基盤となるクラスターイオンビームの強度化に係る技術を開発するとともに、シングルエンド加速器におけるイオンビーム分析の3D化などに係る基礎技術の開発を行った。

実施する研究開発

・先端材料創製研究のツールとなる局所的に高エネルギーを付与するイオンビームについて、その形成・加速・制御技術を開発する。

・イオンビーム生成・加速・制御について、その安定性の向上、調整の迅速化、及び加速の効率化等により施設の利



便性を高めるとともに、照射プロセスや小型加速器の開発等を進め、量子ビーム応用研究及びその産業応用の推進を支援する。

達成目標

- ・高エネルギーを付与するイオンビーム開発の第一段階として、第3期には、現有タンデム加速器を用いて実現可能であるMeV級クラスターイオンビームの形成・応用技術を開発する。
- ・利用者のニーズに的確に対応して、サイクロトロンの利便性の向上及び制御・運転の自動化、静電加速器における分析・加工技術の高度化を目指して、ビームの高エネルギー化・大電流化、安定化・再現性向上、輸送効率向上、ビーム切換時間短縮等の技術開発を継続する。

最終的なアウトカム

TIARAの特性を最大限引き出す技術開発を積み重ねることにより利便性を向上して、局所的な照射効果を起こすことを利用した新奇材料創製など、量子ビーム利用の拡大を図り、科学技術イノベーション創出のハブとしての「量子ビームプラットフォームの整備」及び「量子ビームサイエンス&テクノロジー」を推進する。

高度化、利用する量子ビーム施設

10-15年後までに、超伝導ECRイオン源の導入、サイクロトロンの制御、運転の自動化技術の開発を進め、施設・装置の利便性を向上させるとともに、複合利用を推進する

8

研究テーマ名 多様な量子ビーム施設・設備の整備とビーム技術の研究開発

研究のねらい 荷電粒子・RI利用研究に資するため、TIARAにおける高強度MeV級クラスターイオンに係る発生・加速・ビーム技術等の開発を行う。

これまでの実績
 フランスを中心にタンデム加速器を用いてクラスターイオンをMeVエネルギーに加速し、そのビームを用いた標的との相互作用を調べる放射線物理研究が進められているが、材料開発などの本格的な応用研究はされていない。
 国内では、日本における高速クラスター研究の拠点であるTIARAにおいてクラスター構造の解析方法を開発し、2次イオン生成量増大などのクラスター特有の照射効果が構成原子数とともに大きくなることを見出した。

実施する研究開発
 安定に利用できるクラスタービームの中で最も大きく照射効果が高いMeV級フラーレンビームを既存の静電加速器により実現する。単一イオンより遥かに大きな局所的物性変化及び大質量2次イオン生成効果などを活かした先端材料創製研究及び表面分析技術開発等の利用を拡大する。

達成目標
 ・MeV級クラスターイオンビーム特にフラーレンイオンビームについて、イオン源及びビームラインの開発、荷電変換機構等の改良による大強度化及びマイクロビーム化に対応した照射チェンバーの開発を行う。これとともに、高感度SIMS分析、先端材料創製等への応用を進める。

最終的なアウトカム
 表面の微量な元素分布等を分析する技術の高感度化、単原子イオンビームよりもより局所的な照射効果を起こすことを利用した新奇材料創製など、「量子ビームサイエンス&テクノロジー」を推進する。具体的には、材料の局所で磁性等の物性を微細に変化させるなどによる新奇材料創製、従来のSIMS分析と比較して、二次粒子発生量が多くS/Nが向上、高分子量化合物の分析にも範囲を拡張することにより、大きな分子での切断による原物質同定の正確化などが期待されるイオン分析法の開発が期待できる。

高度化、利用する量子ビーム施設
 10-15年後までに、クラスターイオンビームのマイクロビーム化、方向制御などのビーム技術を開発し、シングルイオンビームとの複合(比較)利用に供する。

9

研究テーマ名 多様な量子ビーム施設・設備の整備とビーム技術の研究開発

研究のねらい 荷電粒子・RI利用研究に資するため、TIARAにおけるビーム計測・照射技術等の開発を行う。

これまでの実績
 TIARAの加速器を活用し、様々なエネルギーやイオン種のマイクロビームを提供することができる世界有数の拠点として、3D-PIXE分析技術、PBW (proton beam writing) 技術を実用化した。

達成目標
 ・イオン分析の高感度化及び定量化等により、元素分布に加えて分子状態も評価可能な基盤技術を確立する。
 ・植物イメージングにも応用可能なコンプトンカメラを量子ビーム応用研究センターと共同して開発する。また、群馬県がん特区事業に参画して、診断用コンプトンカメラの実用化を図る。
 ・小型マイクロビーム形成装置の開発を進めつつ、1µm以下のナノ加工技術の開発を進める。

最終的なアウトカム
 TIARAのイオンビームを最大限活用して、分析技術の高感度化、加工技術の高精度化等を図ることにより、機構内外の量子ビーム応用研究の拡大を図り、科学技術イノベーション創出のハブとなる「量子ビームプラットフォームの整備」を推進する。

高度化、利用する量子ビーム施設
 10-15年後は、現有TIARAの特性を安定かつ再現性良く発揮させるため、ビームライン及びチェンバー等を改造するとともに、小型マイクロビーム専用加速器等の導入を図りその利用技術を開発する。

10

実施する研究開発
 ・エネルギー弁別、位置検出及びリアルタイムのビーム計測・検出技術を開発する。
 ・元素・化合物及びその分布分析を目的としたイオン分析の高感度化、高空間分解能化を図る。
 ・エネルギー及び位置の可変を制御したマイクロビーム形成・描画技術を開発する。

資料10B-7

先進ビーム技術研究の計画

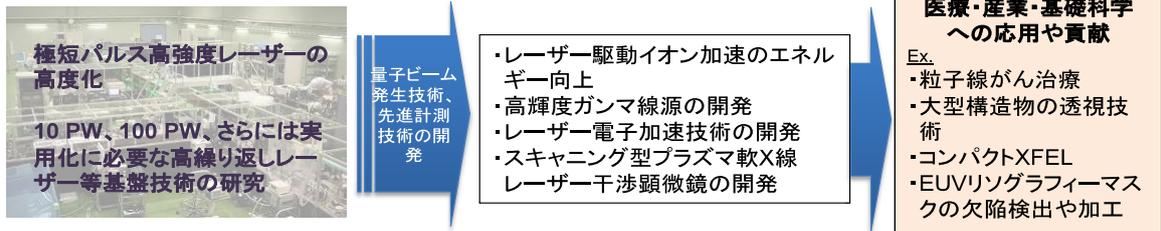
近藤 公伯

①

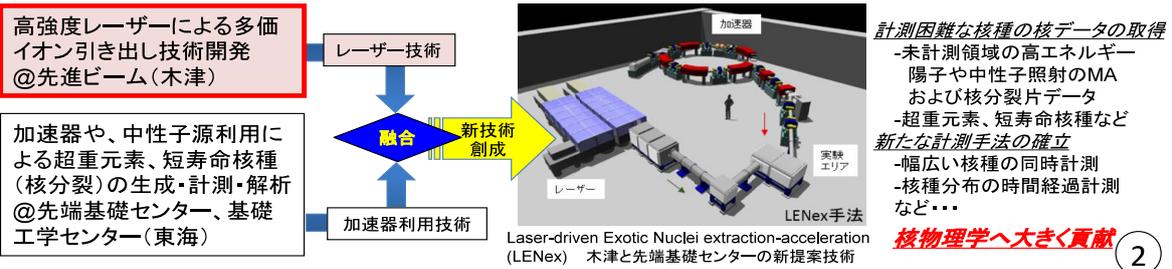
第3期中期計画における先進ビーム技術研究

概要 高強度レーザーを利用した新しい量子ビーム源の発生技術及び先進計測技術の開発を進め、医療・産業・基礎科学への応用を目指す。特に、レーザー技術と加速器技術の融合が可能にする、重イオンや短寿命核種等の生成・引き出し技術の開発を進め、核変換断面積等のデータ取得へ貢献する。

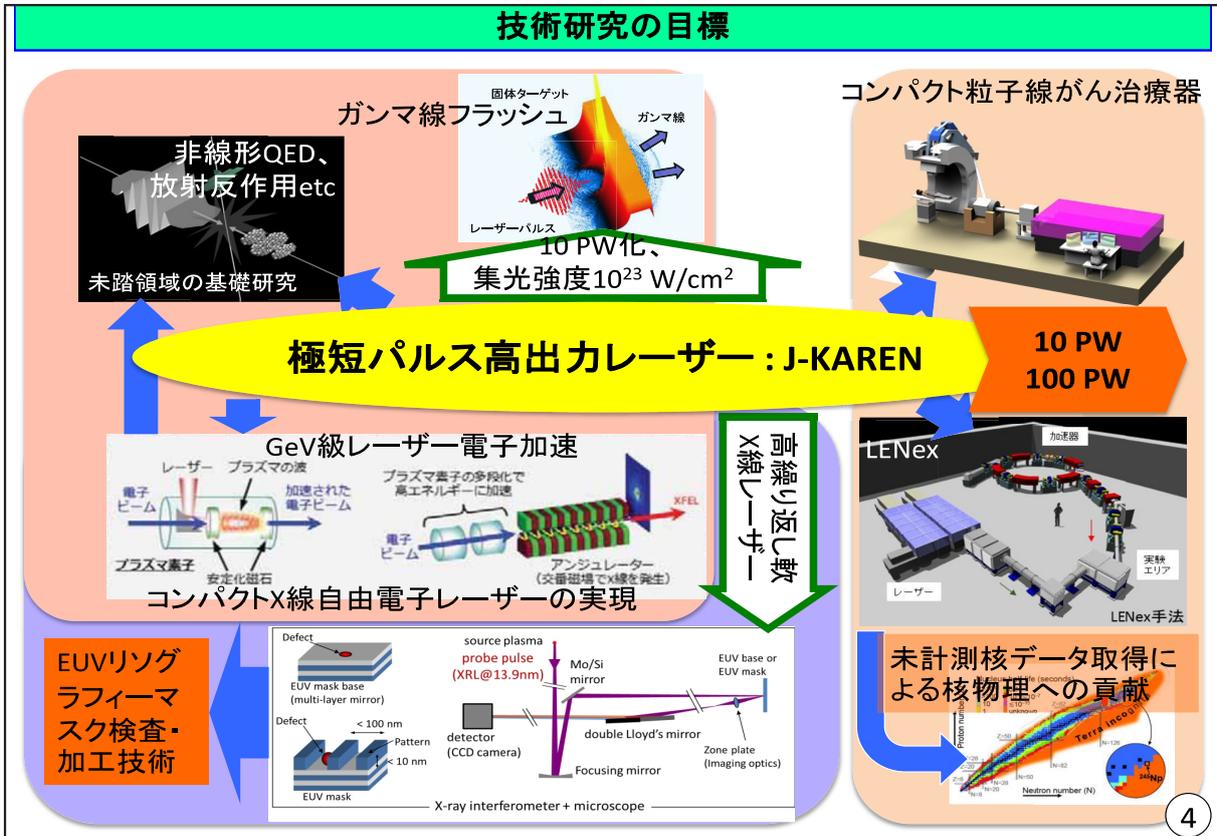
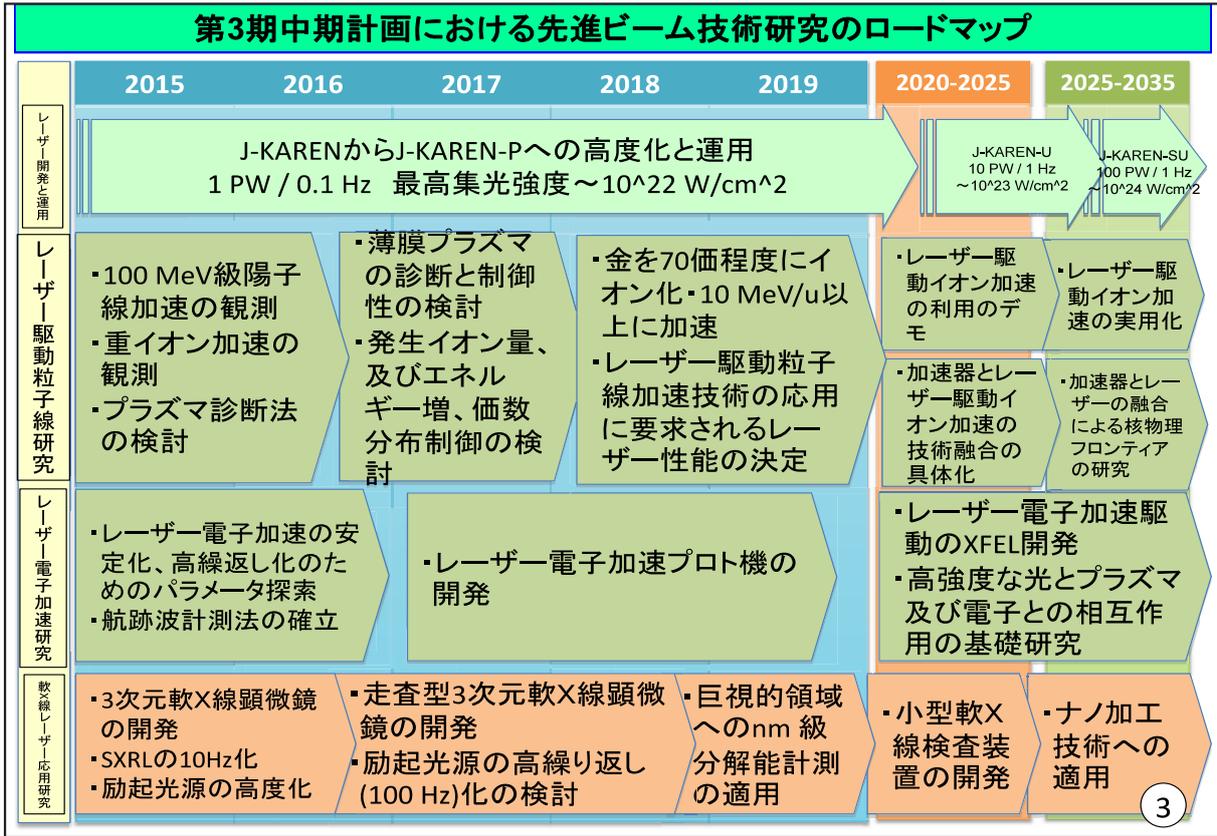
① 高強度レーザーによる新たなX線、ガンマ線、電子線、イオン線発生技術や先進計測技術の開発を行い、医療・産業・基礎科学への応用を目指す。



② 核物理学にフロンティアをもたらす、核変換断面積等核データ取得法の革新的技術を、高強度レーザーによるイオン加速技術と従来型加速器技術の融合で可能にする。



②



第3期中期計画において課題とすべき技術開発

i) J-KARENからJ-KAREN-Pへの高度化と運用

- J-KARENの高度化を完了し、J-KAREN-Pとして運用する。

ii) レーザー駆動イオン加速の研究

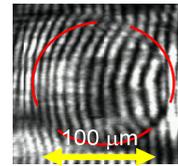
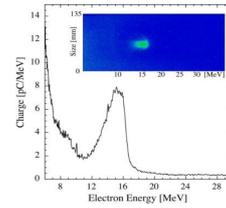
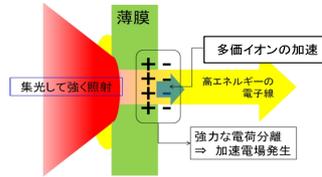
- 薄膜ターゲットの照射においてコントラスト比 10^{11} 以上、集光強度 $10^{22}W/cm^2$ 級の実現により100MeV級陽子線発生をする。
- 70価程度まで金をイオン化し、核子あたり10MeV以上まで加速する。

iii) レーザー航跡場電子加速の研究

- レーザー航跡場の診断技術を確立する。
- レーザー航跡場電子加速の安定化、高繰り返し化のためのパラメータを調べ、レーザー電子加速プロト機を開発する。

iv) 軟X線レーザー高繰り返し化と計測技術開発への応用

- 励起レーザーの繰り返しを10Hzにし、軟X線レーザーを高度化する。
- 走査型3次元軟X線顕微鏡を開発し、巨視的領域でnm級分解能計測をデモする。



5

ビームの相補的・複合的利用と最先端解析機器群の活用

理研 RIBF

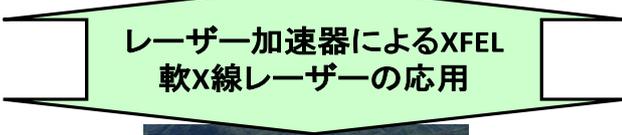
東海 タンデム

高崎 TIARA

イオン加速器



木津地区のパワーレーザー



XFEL Spring-8

6

各研究テーマ説明資料

7

研究テーマ名 レーザー駆動イオン加速を利用した多価重イオン引き出し技術の開発

研究のねらい

核変換断面積等のデータ取得への貢献を目的とした、重イオンや短寿命核種等の生成・引き出し技術に直接結びつく、レーザー駆動多価重イオン引き出し現象の実験的検証。

これまでの実績

- ・がん治療等に向けたレーザー駆動陽子加速器の実現にむけて、最大43 MeVの陽子線加速に成功。
- ・未計測領域の核データ取得等に向けた、重イオン引き出し実証実験において、鉄原子をほぼ完全電離状態で核子あたり16 MeVで引き出し。

実施する研究開発

- ・J-KAREN-Pを完成し、薄膜を用いたレーザー駆動イオン加速実験を行い、200 MeV級の陽子線発生を目指す。
- ・安定元素を、核子あたり10MeV近くで引き出す手法を開発する。また、その際のプラズマ状態を観測し、レーザーを使った高電離イオン引き出しの制御性を明確にし、核物理学等(未計測核データ収集)に貢献が期待される重イオン・短寿命核種等生成・引き出し技術の可能性を検証する。

達成目標

- ・核子あたり100 MeV級のイオン発生。
- ・金原子の70価程度までの高電離を実証。核子あたり10 MeV程度で引出しを実証し、その加速機構を明らかにする。
- ・LENexデモ用の高性能レーザーの検討。

最終的なアウトカム

- ・レーザー駆動コンパクト粒子線治療の基盤技術
- ・既存加速器技術とレーザー技術の連携を促進し、生成・利用が困難な元素の利用技術(LENex: Laser driven Exotic Nuclei extraction-acceleration)を確立して、未計測核データ取得に寄与し、核物理学・原子力工学の発展に貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

関西研J-KAREN-P、関西研JLITE-X、原科研タンDEM加速器、高崎研TIARA、理研加速器 etc.

8

研究テーマ名 高強度レーザーを用いた電子加速研究と高強度科学の推進研究

**研究の
ねらい**

コンパクトX線源やガンマ線源を目指した高強度レーザー技術の成熟化と新たな量子ビーム源の可能性を探る基礎研究を行う。

これまでの実績

- 多価イオンガスを用いた低強度、準単色電子ビームの生成に成功
- ガスターゲットを用いた新しいX線発生機構の発見とそれによる短波長コヒーレントX線の生成
- 放射減衰効果を取り入れた定式化による新しいガンマ線放射機構を提唱

実施する研究開発

- 加速に深く関わる航跡波の分布計測システムを開発する。
- 安定な電子ビーム生成のための低強度化、レーザーの安定化の開発を行う。
- コヒーレントX線、ガンマ線発生の研究を行ない、keV級X線生成を行う。

達成目標

- 1 GeV級の安定電子加速器の要素技術開発
- keV級コヒーレントX線の生成
- ガンマフラッシュ計測の実施
- 高強度レーザー科学の推進

最終的なアウトカム

コンパクトなkeV級コヒーレントX線源、ガンマ線源による物質、材料研究、非破壊検査に使える実用ビーム源を提供する。また、高強度レーザーを用いた素粒子物理学などの基礎研究に貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

関西研J-KAREN-P、関西研JLITE-X

9

研究テーマ名 レーザー駆動コヒーレントX線による物質構造観察手法の高度化

**研究の
ねらい**

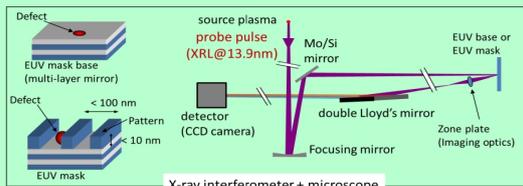
X線レーザーの10Hz化を図り、巨視的領域を高速に走査可能な物質表面微細構造観察に向けた技術開発を行い、EUV露光用マスク等の欠陥検査光源としての成立性を検証する。

これまでの実績

ピコ秒時間スケール及びサブミクロン空間スケールの精度を有するプラズマ軟X線レーザープローブ装置を開発、白金等にフェムト秒レーザーを照射して生じる表面変化を高い時間・空間分解能で観察。特に、干渉計測と反射計測を併用することで、金属溶融面の成長とともに、その上方に拡張する膨張面の時間発展を捉えることができた。

実施する研究開発

チタンサファイアレーザーをポンプ光とする高繰り返し軟X線レーザーの開発により、第二期に開発した物質構造観測手法を高度化するとともに、関連要素技術開発を行い、表面の3次元的な欠陥及びナノ構造の形成過程を観測する為のプラズマ軟X線レーザーを用いたスキャニング型干渉顕微鏡を開発する。



達成目標

- 10Hz高繰り返し高コヒーレント軟X線レーザーの発生
- スキャニング型プラズマ軟X線レーザー干渉顕微鏡の開発
- 高繰り返し高コヒーレント軟X線レーザーによるナノ加工要素技術の開発

最終的なアウトカム

コンパクト高繰り返し軟X線レーザー光源とEUV露光用マスクの表面欠陥等の3次元ナノ構造の検出ならびにナノ加工技術の提供

高度化、利用する量子ビーム施設

ドライバーレーザー(チタンサファイアレーザー)の増力、軟X線レーザーの10Hz化、軟X線干渉顕微鏡の高度化

10

研究テーマ名 10 PW、100 PW級レーザー開発に向けた基盤技術の研究

**研究の
ねらい**

超高強度レーザーとその実用的な利用のための要素技術開発に関する研究

これまでの実績

- ・ペタワット(PW)級超高強度レーザー(J-KARENレーザー)において、世界最高の低光ノイズ化、高集光強度化発振に成功し、フェムト秒高強度レーザー駆動としては世界最高の陽子加速エネルギー達成に貢献した。

実施する研究開発

- ・10PW級超高強度レーザーの構想、設計検討を国内外の外部機関と連携して行う。
- ・高繰り返し、高安定レーザー発振を目指し、LD励起固体レーザー、ファイバーレーザー、フィードフォワード制御、コヒーレント結合、極短パルス発振等の技術の調査を行う。
- ・レーザー光の高品質化を目的とし、セラミック等の新材料、低ノイズ化発振、高耐力光学素子、可変回折格子等の検討を行う。

達成目標

- ・10PW級レーザー建設に向けた外部機関との連携を含めた見通しを得る。
- ・実用的な超高強度レーザー利用研究の展開を図るための基盤技術を確立する。

最終的なアウトカム

- ・高繰り返し、高安定動作が可能な先進的高出力レーザー製品化開発に必要な知見を得る。
- ・繰り返し型100PW級レーザーの実現に必要な技術開発項目を明らかにし、世界の超高強度レーザー開発に貢献する。

高度化、利用する量子ビーム施設

関西研J-KAREN

11

資料10B-8

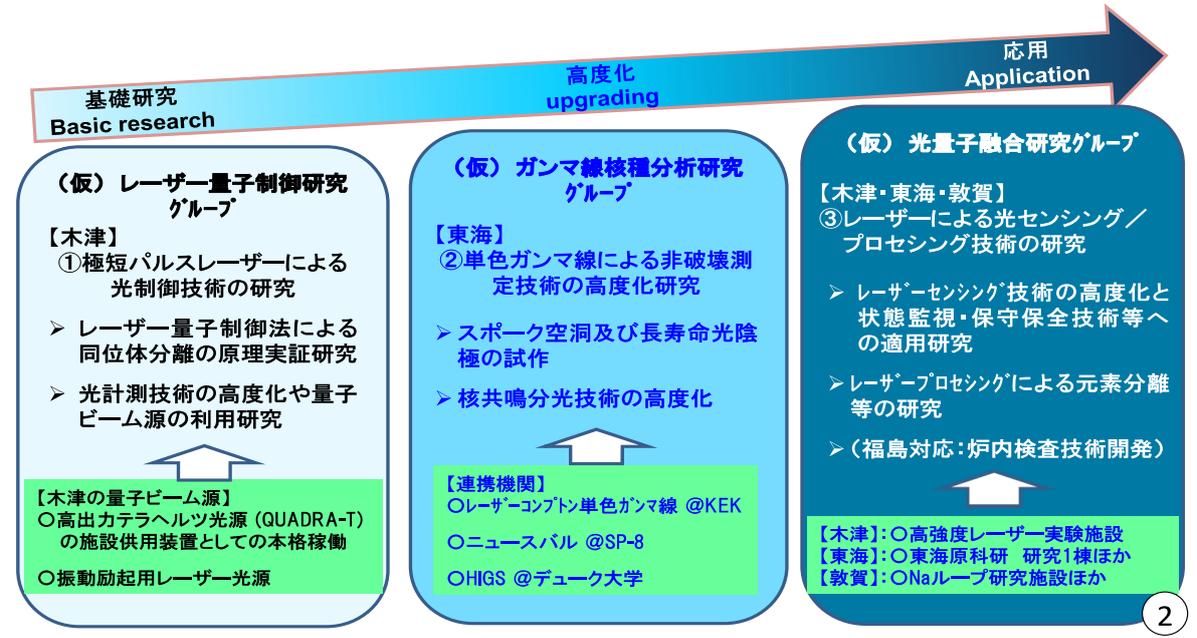
レーザー応用技術研究の計画

杉山 僚

1

第3期中期計画におけるレーザー応用技術研究

概要 原子力エネルギー分野や一般産業分野を念頭に、将来の放射性廃棄物処理技術の提案や非破壊核種分析技術、遠隔モニタリング技術等に極短パルスレーザー及びレーザー駆動のガンマ線・テラヘルツ光等を用いて、基礎から応用にわたる研究開発を行う。



2

第3期中期計画におけるレーザー応用技術研究のロードマップ									
2015	2016	2017	2018	2019	2020-2025	2025-2035			
① 光制御の研究	<ul style="list-style-type: none"> ・振動励起用光源／分散制御デバイス開発 ・同位体選択的励起の基本原理解説試験 ・励起状態の光計測技術開発 ・分子の励起状態計算シミュレーション ・QUADRA-T量子ビーム源の利用研究(分子の配向制御他) 				<ul style="list-style-type: none"> ・高温での同位体分離実証試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ホット実証試験 			
	② ガンマ線核種分析	<ul style="list-style-type: none"> ・スポーク空洞開発 ・長寿命光陰極の試作 ・NRF-NDA測定技術実証試験(高放射線下試験) ・シミュレーションコードの改良(コヒーレント散乱モデルの整理、低濃度核種分析の評価) 					<ul style="list-style-type: none"> ・単色ガンマ線源の高度化技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射性廃棄物計量管理や核セキュリティ技術への適用 	
		③ センシング・プロセスング研究	<ul style="list-style-type: none"> ・FBG光センサの実装技術開発 ・センシング用小型波長可変MIRレーザー開発 ・模擬廃液からの白金族元素の選択的要素分離試験 ・福島対応: 炉内観察技術高度化(光ファイバ放射線計測技術/高放射線下LIBS適用技術) 						<ul style="list-style-type: none"> ・中赤外光センシング実証試験 ・放射性廃液処理試験

3

第3期中期計画において課題とすべき技術開発

① レーザー量子制御法による同位体分離の原理実証研究

【研究の背景】
資源エネルギー庁は、放射性廃棄物を長期間地下にて保管する計画。この計画において、「地下水シナリオ」を回避する技術が必要。

「地下水シナリオ」: 長期(100万年以上)保管中に、長寿命・水溶性の¹³⁵Csが地下水へ溶出することによる被ばくの可能性。

「¹³⁵Csの核変換については有望な概念が見つからない。
同位体分離技術のブレイクスルーが必要である。」(科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会群分離・核変換技術評価作業部会(第2回) H25. 9. 9資料抜粋)

【中性子照射による核変換技術】

問題点: 共存する¹³³Csが、長寿命半減期の¹³⁵Csに変化してしまう。

【カスケード回転励起法】 U.S. PAT. No. 8247762B2 (2012)
分子の回転準位に同調させた特殊な光(テラヘルツ光周波数コム)を照射すると、同調した同位体分子のみがエネルギーを受け取り、エネルギー状態分布(=スペクトル)が高エネルギー側に大きく移動する。

上図は構相の吸収スペクトルが同位体(AとB)で異なる様子。特殊な光の照射によって、構の間隔(エネルギー)の僅かな差が累積され、Bのみ、スペクトル全体が移動する。

QUADRA-T: 1.及び2.の発生研究用光源

レーザー出力: 10 → 100mJ(目標)
THz出力: 3 → ~100μ(目標)
発生頻度: 1kHz
パルス幅: ~1ps

3. UV光

2. 振動励起用光源の開発

1. 高強度テラヘルツ光の高度化

【THz光の応用研究案】

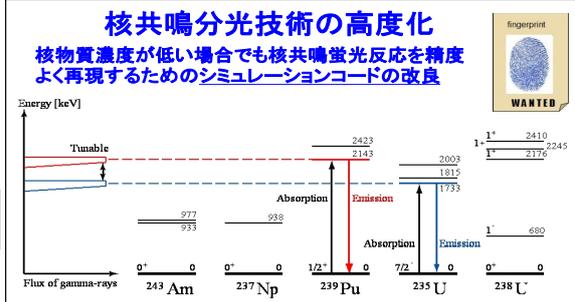
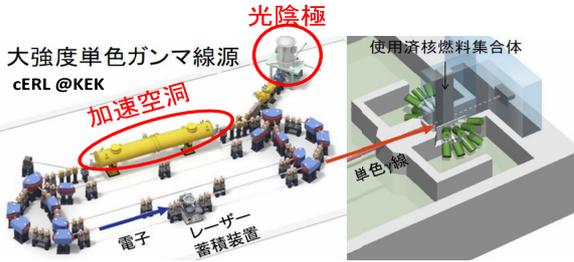
- ・XFELによる構造解析のための分子の配向制御技術
- ・シングルショット逐次イメージング技術

QUADRA-T: highly Quality Ultra Advanced Radiation source - Tera hertz

4

第3期中期計画において課題とすべき技術開発
②単色ガンマ線による非破壊測定技術の高度化研究

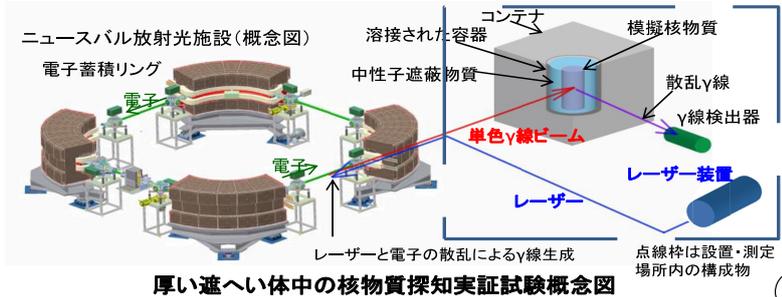
スポーク型加速空洞/長寿命光陰極の開発



ガンマ線利用NRF-NDA技術実証試験(兵庫県立大学ニュースバル@SPring-8)

ニュースバルのγ線発生装置を用いて、コンテナ内の厚い遮蔽体に囲まれた核物質を模擬した物質を検知できるかどうかの実証試験を行う。

ニュースバル放射光施設



5

第3期中期計画における課題とすべき技術開発
③レーザーによる光センシング/プロセッシング技術の研究

<適用分野>

原子力産業
 一般産業(含原子力)

【レーザー光センシング技術開発】

- ◆ 遠隔での放射線/核燃料物質/水素ガス検出
- ◆ 固体/液体LIBS高感度分光分析
(LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy)
- ◆ 高耐熱性FBGによる振動/温度の光計測
(FBG: Fiber Bragg Grating)
- ◆ 非侵襲の血糖値分光計測
- ◆ 波長可変高輝度MIR OPALレーザー開発
(MIR: Mid Infra Red, OPA: Optical Parametric Amplifier)

【レーザープロセッシング技術開発】

- ◆ 伝熱管等の遠隔レーザー補修技術
- ◆ フェムト秒レーザー光の干渉によるFBGセンサー括製作技術
- ◆ 光還元による溶存イオンの価数制御技術
- ◆ 放射性廃棄物の微粒化による白金族(PGM)回収技術

最終的な
アウトカム

- 原子炉や工場プラント等の状態監視・保全技術
- 東電福島第一原発の炉内遠隔検査システム
- 負担軽減につながる放射性廃棄物からの有用金属回収
- 健康長寿社会を支える小型MIR生体センシングデバイス
- 安全・安心を支える有害化学物質の遠隔計測システム



LIBS遠隔分析システム



遠隔計測システム

6

福島復興に係る研究開発

遠隔での放射線モニタリング/水素ガス検知技術に関する研究

- 光ファイバと無機シンチレータを組み合わせたガンマ線検知機能を持つ複合ファイバの実現と遠隔計測の実証試験。
- 光ファイバとガスクロミック現象を誘発する酸化物を組み合わせた水素ガス検知機能を持つ複合ファイバの実現と遠隔計測の実証試験。

高放射線下LIBS適用分光技術(核燃料物質検知技術)に関する研究

- 核燃料物質検知のために、耐放射線光ファイバ伝送による水中LIBS分光システムを用いた放射線環境下(～10⁴Gy/h)の水中分析評価試験。
- 放射線環境下の光ファイバ伝送に優れた近赤外線領域等のU、Pu、Zr等の分光スペクトルデータの取得及び、核燃料物質や炉内構造物の元素識別の実証試験。

水・放射線環境下における画像モニタリング技術の開発

- 耐放射線性観察プローブに3万画素イメージファイバ及び耐放射線性を高めた画像転送光ファイバスコープを組合せた観察システムの試作。
- 上記の観察システムの現場での対応に不可欠な長尺光ファイバスコープの収納・展開機構の試作。

7

量子ビーム・機構内研究施設の複合的利用と最先端解析機器群の活用

主な研究項目	利用する研究施設
①極短パルスレーザーによる光制御技術の研究 (同位体分離の原理実証研究)	○関西光科学研究所(木津) ✓高強度レーザー実験施設C102 ✓QUADRA-T及び振動励起用光源
②単色ガンマ線による核共鳴蛍光非破壊測定技術の高度化研究(東海駐在)	○KEK: レーザーコンプトン単色ガンマ線 ○播磨: ニューズパル ○デューク大学: HIGS (High Intensity Gamma-Ray Source)
③-1 レーザー光センシング技術の高度化と状態監視・保守保全技術等への適用研究	○関西光科学研究所(木津) ✓中赤外高輝度レーザー ✓複合型光ファイバ利用装置 ✓高強度レーザー実験施設: C209,210,211,215 ○レーザー共同研究所(敦賀) ✓超短パルスレーザー、ファイバーレーザー
③-2 レーザープロセッシングによる元素分離等の研究(東海駐在)	○東海原科研(研究1棟) ✓ns~fsパルスレーザーシステム ✓(案)パルス幅・繰返し数可変レーザーシステム ○関西光科学研究所(播磨) ✓SPring-8: BL14B1
レーザー及び光学手法による炉内検査技術の研究(福島復興研究開発)	○関西光科学研究所(木津) ✓高強度レーザー実験施設: 209,210,215 ○レーザー共同研究所(敦賀) ✓超短パルスレーザー及びファイバーレーザー ○原子力科学研究所(東海) ✓研究1棟、NUCEF、JRR-3実験利用棟(第2棟) ○量子応用研究所(高崎) ✓Co60ガンマ線照射施設

8

各研究テーマ説明資料

9

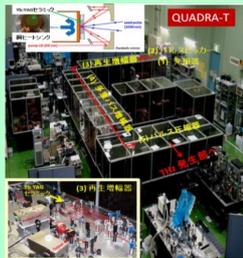
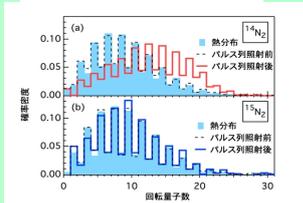
研究テーマ名：①極短パルスレーザーによる光制御技術の研究(同位体分離の原理実証研究)

研究のねらい 将来のセシウム135同位体分離法への適用性を判断するために、前中期計画にて開発したレーザー駆動型の高強度テラヘルツ光発生装置(QUADRA-T)を用いて、模擬分子の同位体選択的回転・振動励起法の基本原理について実証試験を行う。また、施設供用等を通じて高強度テラヘルツ光の利用研究を行う。

これまでの実績

✓1kHzの高繰り返し動作が可能なQUADRA-T光源のプロト機開発。

同位体選択的分布移動の確認



✓窒素分子 $^{14}\text{N}_2$, $^{15}\text{N}_2$ に対して、既存の近赤外レーザー光源による模擬的な同位体選択的加熱に成功。

実施する研究開発

- テラヘルツ光発生技術の高度化及び振動励起用光源の開発
- テラヘルツ光分散制御デバイスの開発
- 分子の選択的分布移動及び観測技術等、要素技術開発
- QUADRA-Tの利用研究

達成目標

- QUADRA-Tを励起光源に用いた高強度・高安定テラヘルツ光の発生及び中赤外振動励起用レーザー光の発生技術の確立。
- テラヘルツ光の分散制御技術の確立。
- ハロゲン化アルカリ分子集団の同位体選択的励起によるエネルギー状態分布移動の実証。

最終的なアウトカム

- 将来のLLFP放射性廃棄物の環境負荷低減につながるセシウム135の核変換による短寿命化に必要な同位体分離技術の提案。
- 高強度テラヘルツ光を利用した高分子の配向制御技術やシングルショットテラヘルツイメージング技術。
- 高平均出力ピコ秒レーザーによる非熱加工技術。

高度化、利用する量子ビーム施設

- QUADRA-T: 関西光科学研究所(木津)高強度
- レーザー実験施設C102

10

研究テーマ名：②単色ガンマ線による核共鳴蛍光非破壊測定技術の高度化研究(東海駐在)

研究のねらい 従来の技術では困難とされてきたコンテナ内等の厚い遮へい体に囲まれた核物質検知等を非破壊で行う大強度単色ガンマ線(レーザー・コンプトン散乱ガンマ線)を利用した核共鳴蛍光非破壊測定(NRF-NDA)技術の高度化のための技術実証を行う。(日米欧協力)

これまでの実績

- ✓500kV/2mA直流光陰極電子銃の実現
- ✓大強度単色ガンマ線(低エネルギー)発生の実証
- ✓核共鳴蛍光散乱(NRF)-NDAの原理確認(測定対象物をディスク形状に限定)
- ✓独自の核共鳴蛍光反応シミュレーションコード開発
- ✓高濃度核物質(ウラン238(99%))試料を用いた核共鳴蛍光反応実験結果の再現確認

実施する研究開発

- スポーク型加速空洞/長寿命光陰極の開発
- 現存する単色ガンマ線(高エネルギー)によるNRF-NDAの実証試験
- 核物質濃度が低い場合でも核共鳴蛍光反応を精度よく再現するための独自シミュレーションコードの改良

達成目標

- スポーク空洞/長寿命光陰極の試作・性能評価。
- ニュースバルのγ線発生装置を用いた模擬核物質検知の実証試験。
- デューク大のHIGS (High Intensity Gamma-Ray Source) でのベンチマーク試験。

最終的なアウトカム

- 核セキュリティや保障措置のための計量管理を目的とした、コンテナ内の厚く遮へいされた核物質等の検知が可能なNRF-NDA技術の提案。

高度化、利用する量子ビーム施設

- レーザー・コンプトン単色ガンマ線 @KEK
- ニュースバル @SP-8
- HIGS @デューク大学

11

研究テーマ名：③-1 レーザー光センシング技術の高度化と状態監視・保守保全技術等への適用研究

研究のねらい 原子力/工場プラントの状態監視・保守保全技術等の向上を目的に、レーザー光センシング技術の研究を行う。これら基盤技術について、一般産業への適用を目指す。

これまでの実績

- ✓耐熱FBGセンサの超短パルス光加工、配管実装及び高速モニタリング技術の統合。
- ✓伝熱管内観察とレーザー補修技術が可能な試作機の開発。
- ✓産業展開のためのVB設立。

実施する研究開発

- プラント監視技術開発:FBGセンサによる配管歪の常時計測(Naループを含む)
- 高経年プラント保守保全技術開発:試作機の高度化と産業利用への展開(含福島発電所炉内観察)
- 波長可変高輝度中赤外レーザーの開発
- MIR光リモートセンシング技術の開発



Naループ建設



高経年化プラント

達成目標

- FBG実装試験による配管歪の経時変化の把握
- 光ファイバセンサの安定・量産製作技術の確立
- レーザー補修技術の一般産業への適用試験
- 小型波長可変(2-10μm)高輝度MIRレーザーの試作

最終的なアウトカム

- 原子炉への状態監視・保全技術の適用
- 光・レーザー技術の産業利用(原子炉、核融合炉、保守保全一般、医療機器、他)
- 上記による安心・安全・健康・長寿社会への貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

- 中赤外高輝度レーザー、複合型光ファイバ利用装置:関西光科学研究所(木津)高強度レーザー実験施設C209,210,211,215
- 超短パルスレーザー及びファイバレーザー:レーザー共同研究所

12

研究テーマ名： ③-2 レーザープロセッシングによる元素分離等の研究（東海駐在）

研究の
ねらい

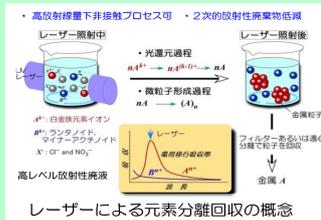
高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化を目的に、レーザー照射によって廃棄物中の白金族元素(PGM)を分離回収する研究を行う。

これまでの実績

- ✓レーザー誘起微粒子化による混合溶液からのPGM (Ru, Rh, Pd) 選択的分離回収法の提案と実証。
- ✓液膜ジェットを用いたレーザー誘起ブレイクダウン分光 (LIBS)による高感度溶存元素分析の開発。
- ✓ファイバ伝送LIBSによる水中固体試料の組成分析技術の実証に成功。

実施する研究開発

- レーザー誘起微粒子生成により、PGMを選択的に相互分離する研究を行う。また、使用済放射性廃液に本手法を適用して実証試験を行う。
(研究協力:基礎工・分析化学Gr、量ビ・量子ダイナミクスGr.)
- LIBS技術の高度化として、溶液中の同位体組成など、その場での超高感度分析法を開発する。
(研究協力:基礎工・燃料デブリ解析研究Gr、京都大学、東京大学、徳島大学)



達成目標

- 使用済放射性廃液を用いたPGM回収実証試験を行い、レーザー元素分離技術の有用性を提示する。
- 溶存元素のその場同位体組成分析法を確立し、LIBS技術の適用分野を開拓する。

最終的なアウトカム

- 放射性廃棄物処分負担軽減に寄与
- 革新的なPGM元素分離技術の確立
- 高精度同位体分析のレーザー前処理技術への発展
- 東電福島第一原発の遠隔分析技術としての実用化
- 他分野で適用可能な、その場高感度分析法の提供

高度化、利用する量子ビーム施設

- ns~fs/パルスレーザーシステム: 東海原科研 研究1棟
- パルス幅(数ns-数100ns)・繰返し数(1Hz-1000Hz)可変レーザーシステムの研究連携等による構築(案)
- 関西光科学研究所(播磨)SPring-8: BL14B1

13

研究テーマ名： レーザー及び光学手法による炉内検査技術の研究（福島復興研究開発）

研究の
ねらい

東電福島第一原発炉内部の燃料デブリ状況把握に必要な技術を提案するために、光ファイバ伝送をベースとしたレーザー及び光学手法による炉内検査技術を研究する。

これまでの実績

- 複合型光ファイバスコープを用いた水中画像モニタリングに成功。
- 高崎研においてLIBS用光ファイバケーブルのガンマ線照射試験を実施し、1MGy照射損傷後においても使用可能な波長領域を特定することに成功。
- 耐放射線ファイバを用いて、水中の固体試料の組成分析が行えるガスフロー型プローブヘッドを開発し、模擬燃料デブリの分析試験に成功。

実施する研究開発

- 前年度までに開発したレーザーモニタリング技術、ファイバスコープ技術、放射線計測技術、LIBS計測等、各要素技術の高度化を進め、これらを統合した試作機を開発する。さらに、過酷損傷炉心の現場に対応するための機能として、長尺光ファイバの収納・展開機構の開発を行う。

達成目標

- 長距離(60m)伝送光ファイバスコープの構築
- LIBS分光技術の高度化、分光データベース構築
- 放射線及び水素ガス検知用光ファイバの試作
- 統合試作機の完成及び機能評価試験

最終的なアウトカム

- 東電福島第一原発の遠隔分析技術としての実用化。

高度化、利用する量子ビーム施設

- 関西光科学研究所(木津)高強度レーザー実験施設: C209,210,215
- レーザー共同研究所(敦賀):ファイバレーザー及び超短パルスレーザー
- 原子力科学研究所(東海):研究1棟、NUCEF、JRR-3実験利用棟(第2棟)
- 量子応用研究所(高崎):Co60ガンマ線照射施設

14

資料10B-9

原子力・産業応用レーザー技術開発の計画

大道 博行

1

第3期中期計画における原子力・産業応用レーザー技術開発

概要

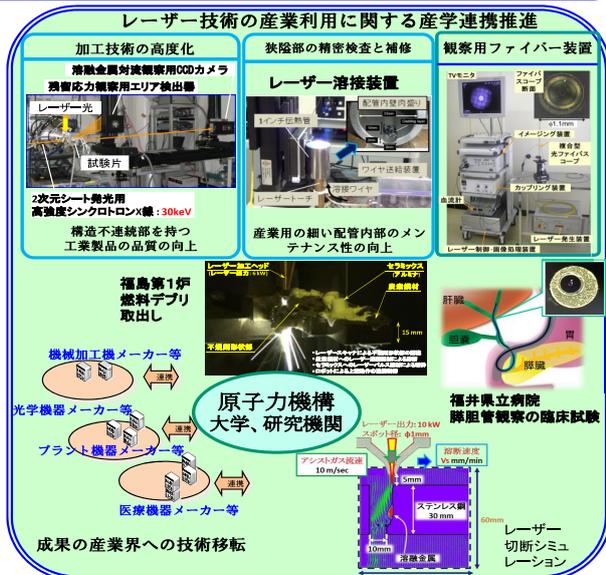
光・レーザー技術を原子力施設に展開するとともに、地元企業等と連携し産業利用に資する。

レーザー共同研究所では、原子炉の保守保安や廃止措置に光・レーザー技術を適用するため関連する要素技術の研究開発を進めてきた。蓄積した光・レーザー技術を国民的課題である福島事故処理に役立たせるべく総力を挙げて取り組んでいる。また原子力に端を発する光・レーザー技術の産業・医学利用等の発展に努めている。

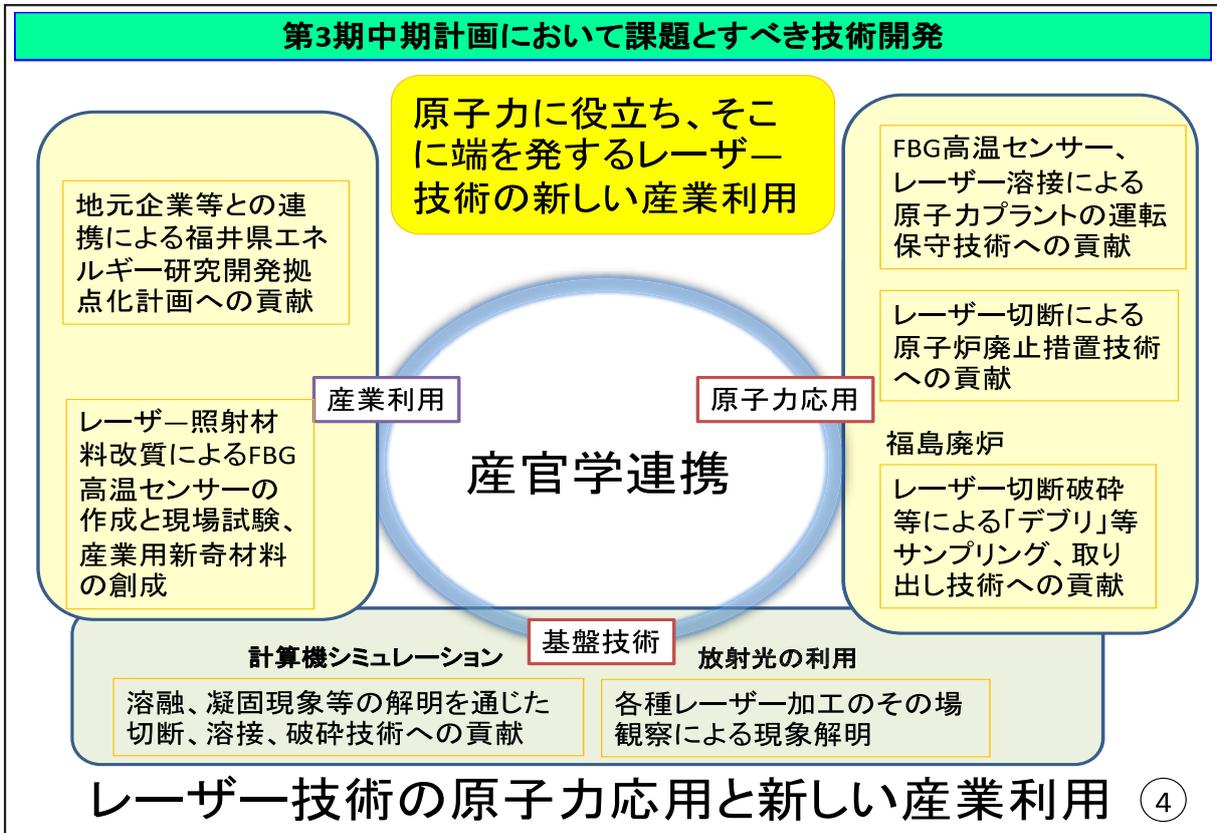
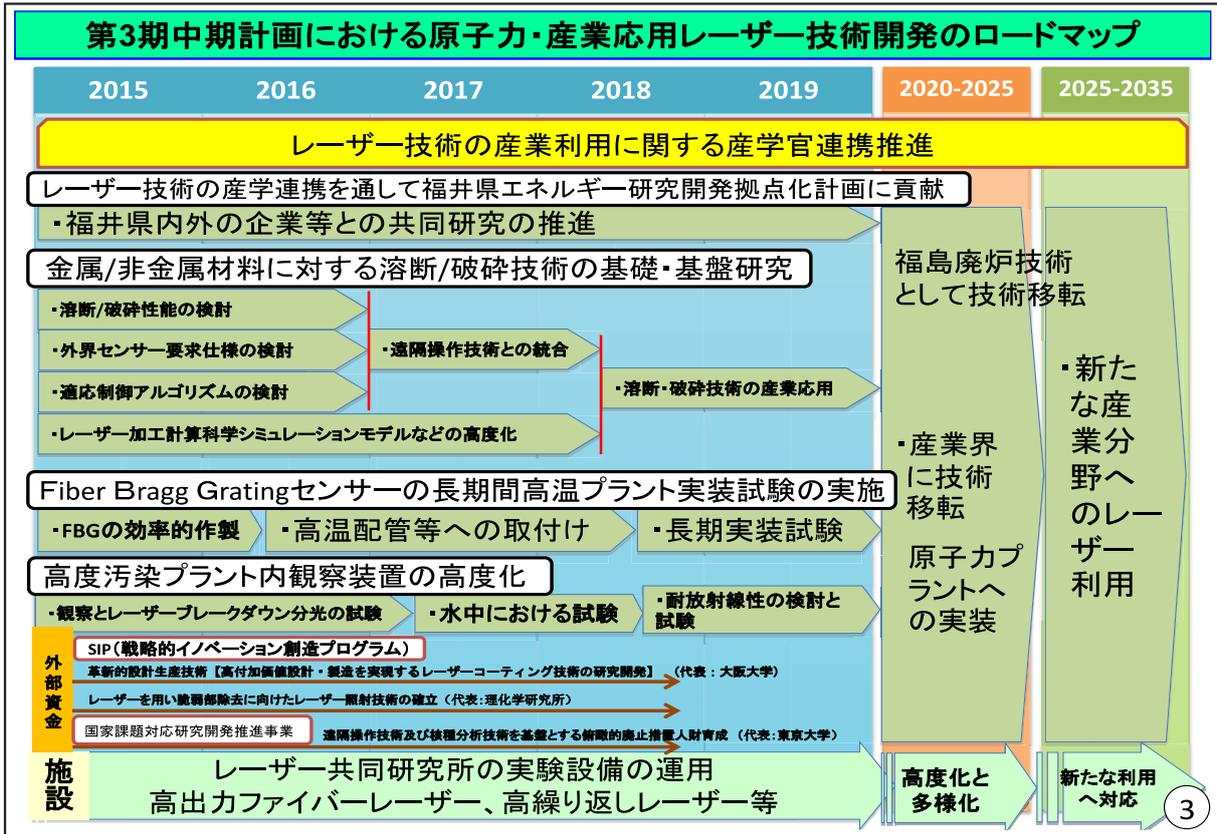
本産学連携推進事業では、この光・レーザー技術を産業利用に資するため、必要な実験データベース構築、要素技術の開発、シミュレーション技術開発、標準化等を進める。またこれらを効率的に進めるために大学、研究機関、企業等と施設利用や人的交流を活発に行い相補的・相乗的な協力関係を築く。地元企業等との連携、地元等へのアウトリーチ活動を推進する。このような活動に対して機構内外から強い期待が寄せられている。

・今後10-30年後の中長期目標

培ったレーザー技術を原子炉廃止措置・プラント保全等に活用していくこと。これらを踏まえ新たなレーザー利用技術としてインフラ保守・保安、災害対応等の国土強靱化技術および自在な物づくり技術への貢献も目指す。



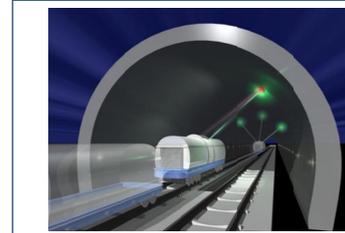
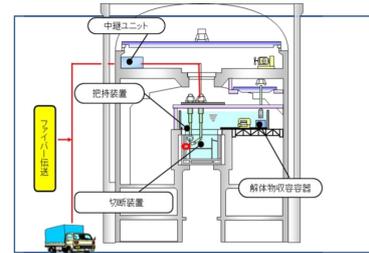
2



2. 取り組むべき課題

i) 原子力施設保守保全等へのレーザー技術の貢献

- 原子力プラントの運転保守技術、廃止措置への貢献
 - 金属/非金属材料に対する溶断/破砕試験の基礎
 - 外界センシングと適応制御技術
 - レーザー加工の計算科学シミュレーションコードの基礎
 - Fiber Bragg Gratingセンサーの長期間高温プラント実装試験の実施
 - 高度汚染プラント内観察装置の高度化



5

ii) 福島廃炉技術への貢献

- レーザーによるデブリ取出し技術の開発
- 光・レーザー技術による遠隔観察技術の開発

iii) 新たな産業利用への展開

- 商用プラント廃止措置技術への貢献
- シミュレーション技術と一体となったレーザー加工技術を駆使した物づくり技術への貢献
- 土木・建設産業への適用を図る中で焦眉の課題である・国土強靱化への貢献

ビームの相補的・複合的利用

レーザー技術開発

○レーザー溶融、溶接現象の可視化、短パルスレーザーによる表面改質等の物性評価 ⇒ 放射光
内部観察技術

○レーザー加工シミュレーション技術 ⇒ 放射光を用いた観察、スーパーコンピューター
シミュレーション技術

○耐放射線性能の確認 ⇒ ガンマ線
耐放射線技術

○FBGセンサーの効率的作製 ⇒ 短パルスレーザー
微細加工技術

利用
フィードバック

ビーム相補的・複合的利用

放射光 関西研(播磨)



SPring-8

超並列スーパーコンピューター(東海)



PRIMEHPC FX10

富士通㈱ホームページより転載

ガンマ線
高崎研



関西研(木津) 大出力レーザー
敦賀 高繰り返しレーザー

6

福島復興に係る研究開発

7

デブリ取り出し技術に関する研究

- 東電福島第一原発の燃料デブリ取り出し作業に使用可能なレーザー溶断技術の開発。
- 高放射線下での水中遠隔操作技術の確立。

原子力用耐放射線性の観察技術に関する研究

- 東電福島第一原発の汚染水処理・貯蔵や燃料デブリ取り出し作業にあたり、使用される内部観察装置の開発
- 高放射線下での水中遠隔操作技術の確立。

7

各研究テーマ説明資料

8

レーザーによる金属/非金属材料の溶断/破砕技術の開発

研究の ねらい

レーザーが持つ照射自由度、局所加工性、遠隔操作性などの特徴を最大限利用し、原子炉構造物などを構成する金属/非金属材料の溶断/破砕技術を開発する。また、発生する物理機構を定量化するため、計算科学シミュレーションコードを開発する。以て、レーザー技術の原子力利用、産業利用の促進に資する。

これまでの実績

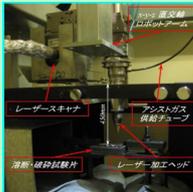
ふげんの廃止措置、福島燃料デブリの取出しなどを対象として、連続発振レーザー光の連続照射による厚板金属溶断およびパルス照射によるセラミックス破砕の基本性能を確認し、産業応用ポテンシャルを見通した。

レーザー光を熱源とした材料加工プロセスに適用可能なシミュレーションプラットフォームを構築し、溶断/溶接プロセスなどへの適用性を確認した。

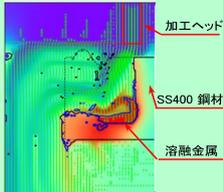
実施する研究開発

溶断/破砕技術の適用範囲の拡大を図るため、外界センシング技術、遠隔操作技術などと整合の取れた融合システムの構築を目指した研究開発を行う。

また、レーザー照射条件などの適切化が行えるよう、計算科学シミュレーションコードの高度化を目指した研究開発を行う。



直交軸ロボット 溶断/破砕試験装置



溶断不良条件でのシミュレーション

達成目標

- 金属/非金属材料に対する溶断/破砕試験の実施
- 外界センシング技術の高度化
- 計算科学シミュレーションコードの高度化
- 開発した技術の原子力産業/一般産業での利用

最終的なアウトカム

- ふげん廃止措置、福島燃料デブリ取出し作業への適用
- 一般産業におけるレーザー溶断/破砕技術の向上
- 計算科学シミュレーションコードの利用範囲拡大

高度化、利用する量子ビーム施設

- 高出力ファイバーレーザー装置 (敦賀)
- 大型放射光試験施設 SPring-8 (播磨)
- 大型並列スーパーコンピュータ (東海)

9

レーザーによる原子炉の保守・保全技術の開発

研究の ねらい

原子炉等の構造物の溶接部などは強い地震や経年劣化などにより強度の低下が起る。これらを適宜モニターし、補修する技術開発を行う。原子力に適用可能な技術は高度な産業技術としての可能性も有している。地域産業界の振興も併せて狙う。

これまでの実績

光量子融合研究Grのレーザー加工技術を発展させ、光回折格子(FBG)センサのプラント実装に向けた技術開発を図ってきた。耐熱温度は600°C以上、配管等への取り付け方もテストし、良好な結果を得ている。

原子力システム研究開発の成果をベースに伝熱管の溶接補修技術を開発した。化学プラント会社からの共同研究を活用し装置小型化の技術開発を行った。また、可視化・分析技術を目指した金属ナトリウムの光学的特性を測定した。

実施する研究開発

FBGセンサはNaループへの実装試験をレーザー補修技術を活用して実施する。FBGセンサ製作の安定量産化を試みる。観察用ファイバースコープの多機能化と小型化を行う。さらに金属ナトリウムの光学的性質のデータベース化とその利用法の検討を行う。これらをNaループ等へ適用した後、原子力プラント等の保守保全に発展させる。

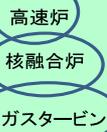
実規模配管でのFBGセンサ試験



小型レーザー補修装置等



建設中のNaループ



達成目標

- 高温下での配管類の歪みの長時間測定技術の実証
- 観察用ファイバースコープの高度化(漏洩水素検出、線量測定などの機能追加)
- 技術開発にあたり地域産業界の振興の視点をもつ

最終的なアウトカム

- FBGセンサは原子炉等へのリアルタイム連続モニタ装置として性能仕様を明確にする
- 観察用ファイバースコープは福島原子力発電所事故処理に適用可能な仕様を明らかにする
- Na試験は物理機構の解明とNa媒体中の可視化分析モニター等として装置化されること。

高度化、利用する量子ビーム施設

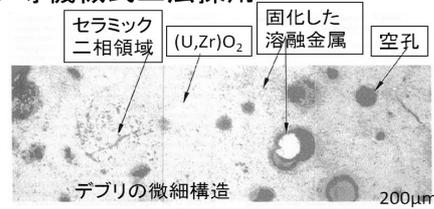
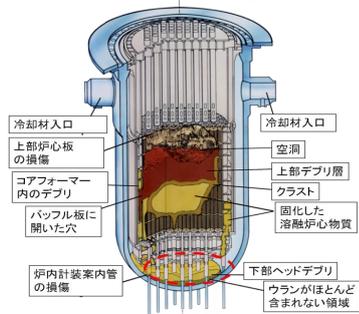
- 高出力ファイバー装置、高繰り返しピコ秒レーザー装置、産業用配管内壁レーザー補修装置(敦賀)、医療用ファイバースコープ(木津)等

10

【添付】
福島対応研究テーマの個々の説明

11

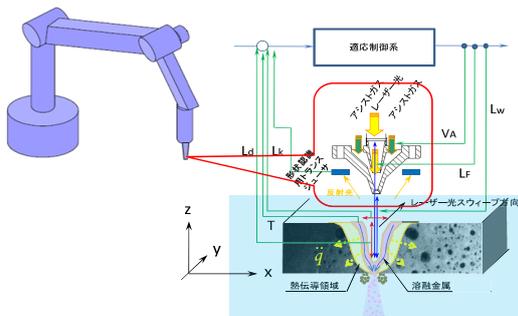
炉心溶融と事故処理の経験[TMI-2 デブリベッド・炉内構造物の取出し]
ボーリング等機械式工法採用



- ・形状不定
- ・高硬度(セラミックス)
- ・多孔質
- ・多成分

Ref. H. W. Kirkland, et al., Nuclear Technology, Vol.87, pp. 932-945 (1989)
Ref. C. S. Olsen, et al., Nuclear Technology, Vol.87, pp. 57-94 (1989)

[福島廃炉に向けたレーザー破碎・切断技術の確立に向けた研究アプローチ]



安全・省力、効率化工法を目指す。

- ・レーザーパワー、パルス幅、波長の最適化
- ・破碎対象の光学的、機械的特性評価
- ・水中試験による機器の開発・最適化、耐放射線特性の評価と性能向上

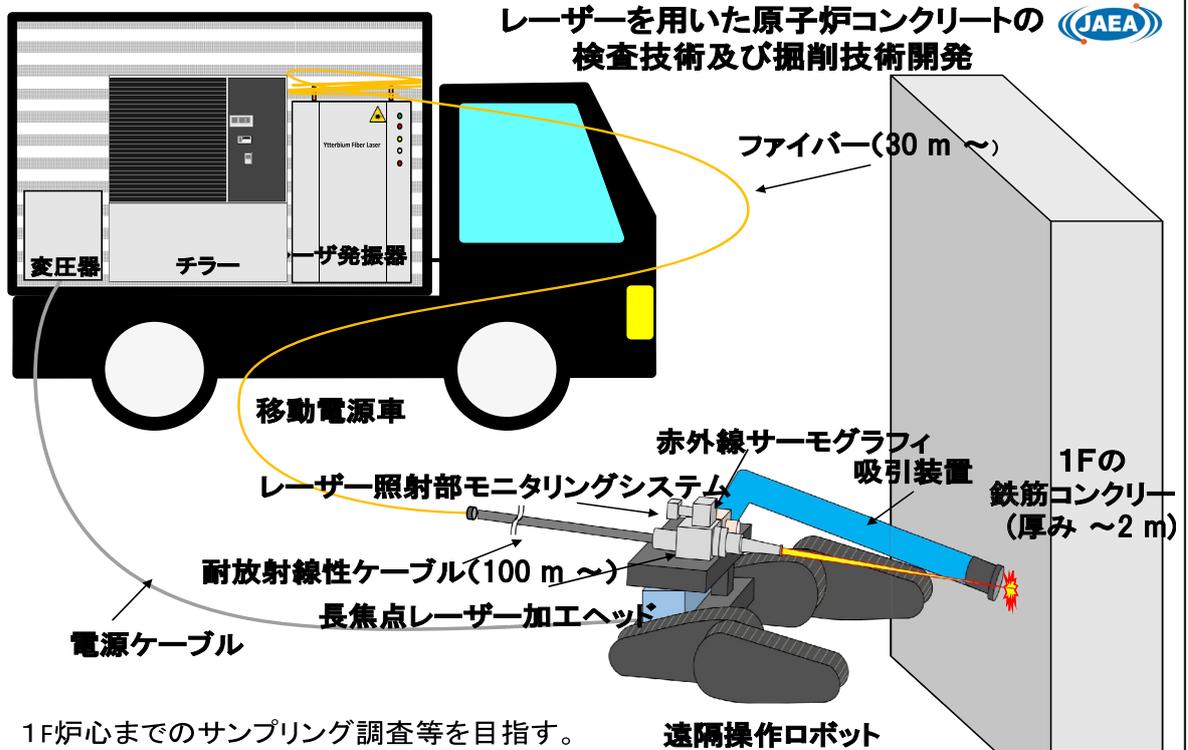
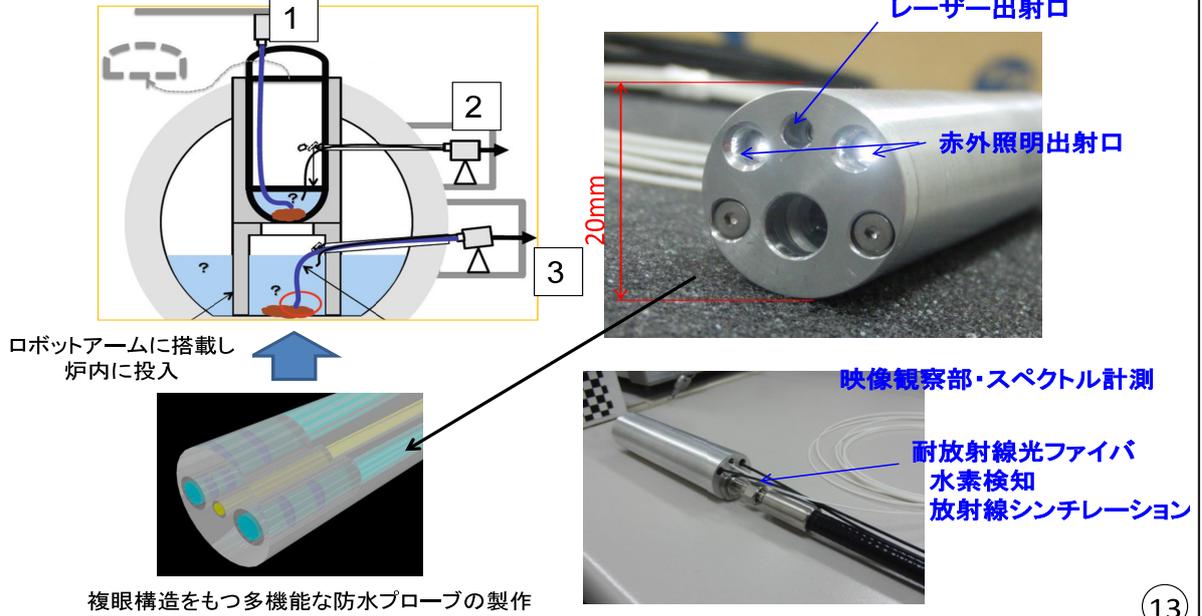
観測変数
Ld : 切断深さ
Lk : 切断幅
T : 溶融金属温度
反射光 (形状認識用)
制御変数
Lf : 焦点距離
Lw : 加工距離
VA : アスストガス流速

12

多機能防水プローブによる高線量炉内の調査

福島原子力発電所炉内燃料デブリへの3ルート

何れも1kSv/hrを超える高線量



資料10B-10

量子ビーム物性制御・解析技術研究の計画

坂井 徹

①

第3期中期計画における量子ビーム物性制御・解析技術研究の研究開発

概要

多彩な先端的量子ビーム利用技術を微細な領域のダイナミクス研究に重点を置いて高度化し、大規模数値シミュレーション技術の高度化とともに、環境・エネルギー分野、原子力開発、福島復興に貢献する研究を推進

オペランド材料評価

その場時分割応力評価
レーザー加工との同時測定

極限環境下測定

超高压下測定

先端的量子ビーム測定

スペックル回折法
磁気円二色性(XMCD)顕微分光
3次元メスバウアー顕微分光
共鳴非弾性X線散乱(RIXS)
中性子・XFELとの相補的利用

量子シミュレーション

数値対角化、第一原理分子動力学計算、スパコン・数値シミュレーションの高度化

エネルギー

超高効率太陽電池
高性能誘電体
(リラクサー: 非鉛圧電材料)
ナドメインエンジニアリング
ナノ階層レベルの理解

福島復興

新規水素貯蔵材料
原子力開発、廃炉
Cs吸脱着材料

環境

高温超伝導材料
省エネルギー材料
省資源材料
脱貴金属触媒

人材育成: 大学との連携(兵庫県立大学、関西学院大学 etc.)

②

第3期中期計画における量子ビーム物性制御・解析技術研究のロードマップ

2015	2016	2017	2018	2019	2020-2025	2025-2035
オペランド材料評価技術の開発						
・単一ナノ構造のその場解析		・窒化物半導体結晶成長の解析		・ヒ化系・窒化物系の融合	・ナドメインエンジニアリング ・超高効率太陽電池の開発	
・応力分布測定(空間分解能<5μm) ・レーザー加工時応力評価			・応力分布測定(時間分解能<1ms) ・原子炉構造材への応用		・原子力・廃炉への貢献	
極限環境下測定技術の開発						
・量子ビーム横断的マルチスケール測定(時分割XRD、時分割XAFS、時分割中性子回折、中性子PDF)			・時分割放射光小角散乱測定開発		・高圧下のナノ階層の理解	
・放射光その場観察利用の高温高压合成 ・中性子の相補的利用					・実用的水素貯蔵材料の開発・高度化	
先端的量子ビーム測定的高度化						
・RIXSの高分解能化(～100meV) ・XMCD顕微分光(蛍光検出法の開発) ・多様なSRメスバウアー分光法開発 ・SACLA利用の時分割コヒーレントXRD		・J-PARC利用の高分解能INS ・XMCD顕微分光(100nm集光、磁化反転観測)		・3Dメスバウアー顕微鏡開発 ・SACLA利用量子光学研究	・高効率デバイス・高温超伝導材料・磁性材料・省資源圧電材料の開発 ・核融合炉壁とプラズマの相互作用の解明	
		・高エネルギーメスバウアー分光 ・金属分子線イオントラップへの応用				
量子シミュレーションの高度化と応用研究						
・Cs吸脱着・カーボンアロイ触媒のシミュレーション ・高温超伝導体(銅酸化物、鉄ニクタイトなど)の数値シミュレーション					・第一原理計算からの物質設計	
施設					← SPring-8高度化	
既存専用ビームラインによる利用技術高度化、研究開発					BL更新に伴う装置開発・整備	SPring-8 IIを利用した研究開発

3

第3期中期計画において課題とすべき技術開発

ストライプ型スピン・電荷秩序
モノクロメータ(E)
試料
検出器
放射光
レーザー
DECTRIS 2M PLATON

RIXS(共鳴非弾性X線散乱)によるスピン・電化秩序観察

省エネルギー材料
省資源材料
(材料・エネルギー・環境)

高圧合成
水素吸蔵材料
(エネルギー・環境・材料)

放射光X線
金属の空間配置

中性子
水素の空間配置

結晶構造解析 二体分布関数解析
長距離平均構造 局所・中距離構造

量子ビームを駆使したマルチスケール測定による水素吸蔵放出時の劣化機構の解明

オペランド材料評価
極限環境下測定
先端的量子ビーム測定
単一ナノ構造・ナノ領域測定
顕微分光、3次元顕微鏡
量子ビーム横断的マルチスケール測定
コヒーレント、SACLA利用

Cs吸脱着機構
Cs回収材料
(福島回復・安全・原子力)

量子デバイス
高効率太陽電池
(エネルギー・材料)

粘土鉱物とCsの相互作用解明をシミュレーションで支援

単一ナノ構造その場解析

回折法:
組織、結晶性、ひずみ、応力、転位密度

イメージング法:
内部観察

放射光その場時分割マルチ測定によるレーザー加工技術の高度化

4

取り組むべき課題

i) オペランド材料評価技術の開発

- ・コヒーレントX線回折・X線スペックル分光などの先端的放射光利用技術を開発し、物質機能発現機構・結晶成長機構の解明に応用する。
- ・その場時分割材料評価システムの高度化を図り、実用材料の加工現象解明、品質評価等に応用する。特にレーザー加工技術の高度化研究に資する。

ii) 極限環境下測定技術の開発

- ・放射光と中性子の相補的利用をはじめ、量子ビームを駆使したマルチスケール測定を超高圧等の極限環境下測定に用い、水素吸蔵材料の高圧合成、劣化機構解明に応用する。また次世代材料となる新規金属水素化物の合成を行う。

iii) 先端的量子ビーム測定の高度化

- ・共鳴非弾性X線散乱法 (RIXS) , 磁気円二色性(XMCD)顕微分光法, ナノ領域3次元メスバウアー顕微鏡などの放射光を用いた先進的な回折・散乱法の研究開発を実施し、従来の計測法では解明できない強相関系や水素貯蔵物質などの課題に取り組むことで、革新的な省エネルギー・省資源型材料の開発指針を得る。

iv) 量子シミュレーションの高度化と応用

- ・スーパーコンピューター・専用大型計算機を用いた、大規模数値シミュレーション技術を開発し、量子ビームを利用した測定・解析実験と連携して、Cs吸脱着材料・貴金属代替触媒・高温超伝導材料・ナノ磁性体等のメカニズム解明を行う。

5

ビームの相補的・複合的利用と最先端解析機器群の活用

○強誘電材料(リラクサー)
⇒ 放射光(コヒーレントX線)
SACLA(自由電子レーザー)
ナノ・サブナノドメイン構造

○応力評価
⇒ 放射光・中性子
コンクリート・鉄筋

○高温超伝導発現機構解明
⇒ 放射光(硬X線、軟X線)
中性子
電荷・スピン励起

○水素貯蔵材料
⇒ 放射光・中性子
結晶構造・水素の位置

ビーム相補的・複合的利用

中性子



放射光



6

各研究テーマ説明資料

7

研究テーマ名

コヒーレントX線利用研究

研究のねらい

高次構造の階層・ダイナミクスを解明し、新規物性の発現・新規電子デバイスの結晶成長制御を可能にするコヒーレントX線散乱・回折・分光手法を開発する。

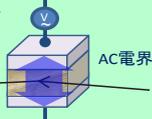
これまでの実績

- 数十nm以下のドメイン構造の1Hzまでのゆらぎを測定できるX線スペckル散乱測定法の技術的基盤を構築
- リラクサー強誘電体の低周波誘電応答とナノサイズドメインの相関を解明

実施する研究開発

コヒーレントX線光源利用が将来普及することを想定し、コヒーレントX線回折・X線スペckル分光など先端的放射光利用技術を、物質の機能発現・結晶成長などに応用するための利用技術の開発をおこなう。

電界中でのナノ構造ダイナミクスをコヒーレントX線回折でその場測定



結晶成長その場測定への応用

達成目標

コヒーレント集光した1ミクロン以下のX線ビームとその場測定との組み合わせを実現することにより、電場下における強誘電体および結晶成長中の半導体のドメイン構造に応用する

最終的なアウトカム

- 鉛を含まない高性能圧電材料
- 多接合・量子ドット系・ナノワイヤ系超高効率太陽電池
- 超低消費電力デバイス

高度化、利用する量子ビーム施設

SPring-8 (BL11XU, BL22XU, BL23SU)
J-PARC, SACLA

8

研究テーマ名 放射光利用による高付加価値設計・製造を目指したレーザー加工技術開発

研究のねらい 放射光を利用したその場時分割材料評価システムの高度化を図り、レーザー加工技術の高度化を中心に、製造、疲労工程での材料強度評価に適用し、価値創生につながるものづくり、グリーン/ライフイノベーション、原子力開発基盤を支える研究開発に貢献する。

これまでの実績

- 放射光を利用したその場時分割材料評価システムによる最速0.01secの応力評価技術の確立
- 応力評価技術提供により科学技術・学術・産業の発展に貢献

溶接直後降温中応力変化

達成目標

- 空間分解能5 μ m以下の応力・ひずみ・集合組織等三次元空間分布計測技術の確立(世界最高水準)
- 時間分解能1msec以下の応力、ひずみ、形状計測技術の確立(世界最速)
- 中性子相補利用によるレーザー加工現象解明

実施する研究開発

放射光を利用したその場時分割材料評価システムの高度化を図り、現象解明、品質評価、レーザー加工技術高度化に関する研究開発を行う。

回折法: 組織、結晶性、ひずみ、応力、転位密度

イメージング法: 内部観察

測定技術開発

応用研究

金属薄膜レーザーコーティング

最終的なアウトカム

- デライト設計実現のためのレーザーコーティング技術の確立、実用化(SIPにより実施)→世界最高品質、コーティング技術革新で世界をリード
- 構造材料の飛躍的な軽量化、長寿命化により、輸送機器(自動車、航空機等)をはじめとするエネルギー利用効率向上に貢献

高度化、利用する量子ビーム施設

【高度化】SPring-8 BL22XU、機構専用BL全般
【利用】J-PARC 匠、JRR-3 RESA
KEK内フotonファクトリー(PF) BL4C

9

研究テーマ名 量子ビームを利用した水素貯蔵材料等の開発

研究のねらい これまでの金属水素化物研究の実績を活かして、水素貯蔵合金の実用化に向けた課題解決の研究を行うほか、次世代を見据えた新規材料開発を行なう。

これまでの実績

金属水素化物研究において、NEDO受託研究などを通じて、希土類系においては高压水素雰囲気中での新しい状態相の発見を行ったり、アルミ合金系においては世界初の侵入型水素化物を合成に成功するなど、世界的成果を挙げた。

実施する研究開発

量子ビームを駆使したマルチスケール測定により、実用材料の問題である水素吸蔵放出時の劣化について機構を解明する。また、次世代材料となる新規金属水素化物の合成を行なう。

量子ビームを駆使したマルチスケール測定

放射光X線 金属の空間配置

中性子 水素の空間配置

結晶構造解析 長距離平均構造

二体分布関数解析 局所・中距離構造

XAFS解析 局所構造

達成目標

- 実用水素吸蔵合金材料の吸蔵放出時の構造劣化を、リアルタイム、且つ、原子レベルで観察、解明。
- 無機系と有機系の両方の特性を有する次世代金属水素化物の合成。

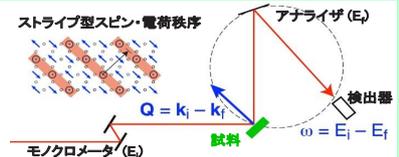
最終的なアウトカム

水素吸蔵放出サイクルによる劣化の起こらない材料の開発。車載、定置など様々なニーズに応える貯蔵材料の開発。

高度化、利用する量子ビーム施設

- SPring-8原子力機構専用ビームライン
- J-PARC

10

研究テーマ名 量子構造研究	
研究のねらい	放射光を用いた先進的な回折・散乱法の研究開発を実施し、これを用いて省エネルギー・省資源型材料（デバイス）研究に飛躍的な進展をもたらすことで、グリーンイノベーションによる持続可能社会の実現に貢献する。
これまでの実績	<p>これまで、共鳴非弾性X線散乱法 (RIXS)、高磁場下共鳴X線回折法および先進的なメスバウアー分光法の開発を行い、世界をリードする装置群の実用化に成功し、これらを用いた基礎物性研究で多くの成果をあげてきた。</p> <p>実施する研究開発</p> <p>共鳴非弾性X線散乱法 (RIXS)、磁気円二色性 (XMCD) 顕微分光法、ナノ領域3次元メスバウアー顕微鏡などの放射光を用いた先進的な回折・散乱法の研究開発を実施し、革新的な省エネルギー・省資源型材料の開発指針を得る事を目的として、従来の計測法では解明できない強相関係や水素貯蔵物質などの課題に取り組む。</p> 
達成目標	<ul style="list-style-type: none"> RIXSの高度化、分解能サブ100meVの実現（銅酸化物高温超伝導体において、超伝導のエネルギースケールにある電子励起の観測） XMCDによる0.1 μm分解能の磁区観察（永久磁石（ネオジウム磁石）の分域毎の磁化反転の観測とこれによる磁石性能向上） ナノ領域3次元メスバウアー顕微鏡の実現（希少元素を使用しないスピントロニクス材料、太陽電池、先進鉄鋼材料、水素吸蔵合金等の省資源・省エネ材料の μm～nm領域での局所分析）
最終的なアウトカム	省エネルギー・省資源型材料（電子・エネルギーデバイス、先進構造材など）の基礎的理解を与えることで、持続可能な循環型社会の実現に貢献する。
高度化、利用する量子ビーム施設	SPring-8, JPARC
11	

研究テーマ名 量子シミュレーション研究	
研究のねらい	量子ビームを利用した先端的な測定・解析実験と連携し、理論模型の大規模数値シミュレーション技術を開発して実験データを解析することにより、高温超伝導材料・新規触媒・Cs吸着材料等の新機能解明を行い、省エネルギー・クリーンエネルギー材料開発と福島環境回復に資する
これまでの実績	<p>分子動力学法・数値対角化等の大規模数値シミュレーション技術の開発により、量子ビーム実験と連携して、高温超伝導・貴金属代替触媒・Cs吸脱着材の機構解明に貢献してきた</p> <p>実施する研究開発</p> <p>スーパーコンピューター・専用大型計算機を用いた、第一原理計算や数値対角化に基づく大規模数値シミュレーション技術を開発し、量子ビームを利用した測定・解析実験と連携して、Cs吸脱着材料・貴金属代替触媒・高温超伝導材料・ナノ磁性体等のメカニズム解明を行う。</p> 
達成目標	<ul style="list-style-type: none"> 反応シミュレーションの高度化 分光解析法の高度化 数値対角化のシステムサイズの高度化 第一原理からのスペクトル解析法の開発
最終的なアウトカム	<ul style="list-style-type: none"> 省エネルギー・省資源型材料の開発 ロスのないエネルギー輸送の実現 福島環境回復
高度化、利用する量子ビーム施設	SPring-8, J-PARCと連携 スーパーコンピューター
12	

資料10B-11

量子ビーム反応制御・解析技術研究の計画

矢板 毅

①

第3期中期計画における量子ビーム反応制御・解析技術研究

概要 放射光および中性子を利用した先端的分析手法の高度化・応用を通じ、持続的かつ安定的なエネルギー利用を実現するため、原子力発電で生じた放射性廃棄物処理、福島廃炉・環境回復問題、安全性向上などに資するアクチノイド基礎科学、材料科学、反応解析、環境科学に関する研究を実施する。

溶液・融体化学

アクチノイド基礎科学

材料科学

反応科学
(表面・界面を含む)

環境科学

放射光利用技術 (μ XRD, DXAFS, STXM, HAXPES, XMCD, XAFS-Imaging) の導入および高度化による先導研究

廃炉・廃棄物処理問題

世界の原発(400弱)
ADS核変換
高インパクト分離試薬
TMIデブリ

環境回復問題

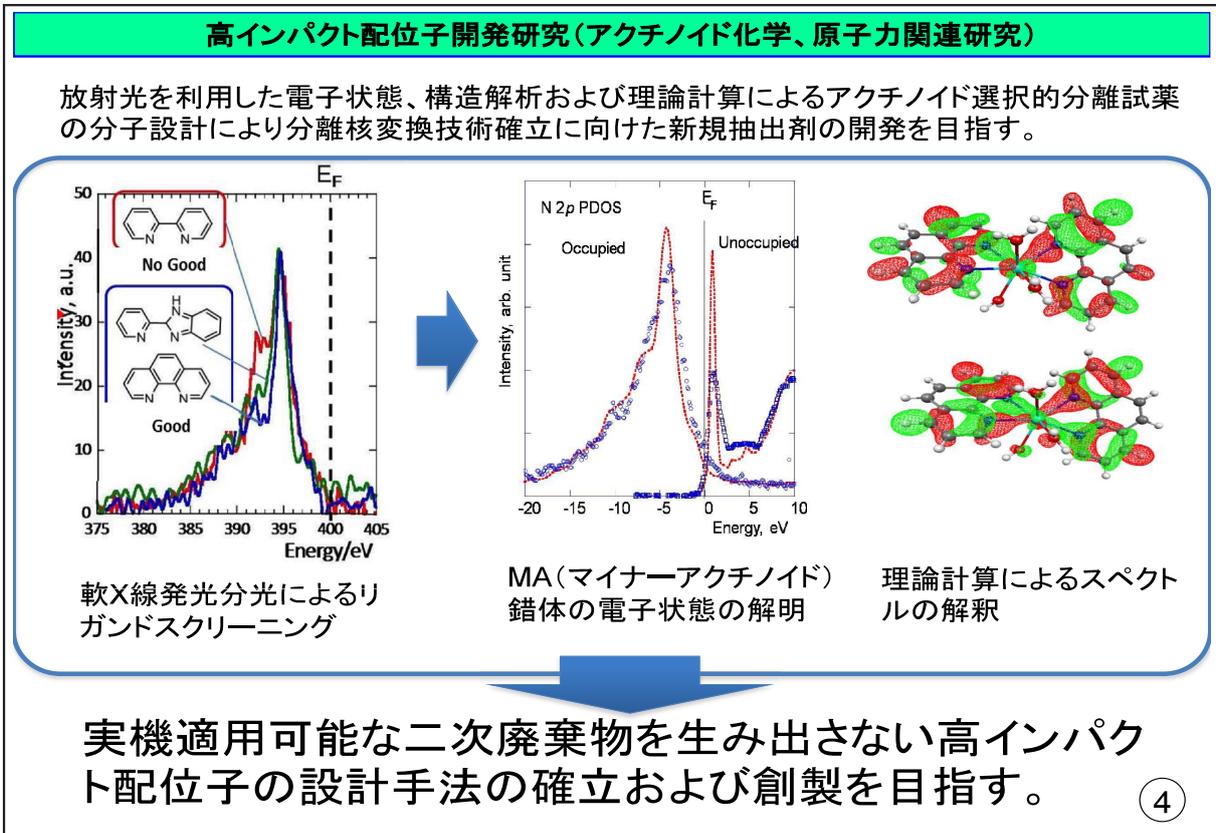
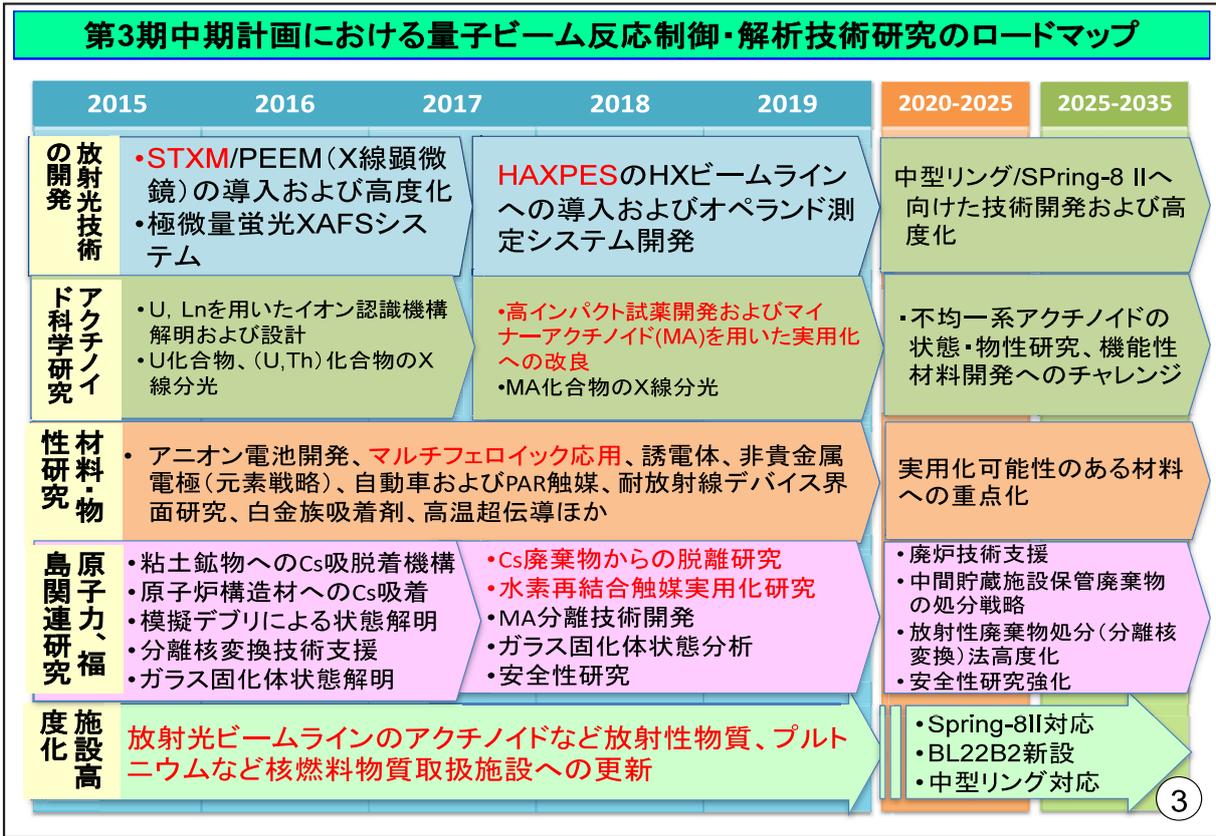
粘土鉱物
水
減圧下でのアルカリ処理(高度化)
福島粘土へのセシウムの取り込み過程の解明

安全性向上・効率化対策

PARを備えた保管
水素再結合触媒の活性温度
電源喪失時のバックアップ技術(発電、蓄電)、水素再結合触媒、化学センサー、送電効率化

原子力(原子レベル)研究における未踏の問題解決を通じた技術利用により、
持続型社会の実現へ

②

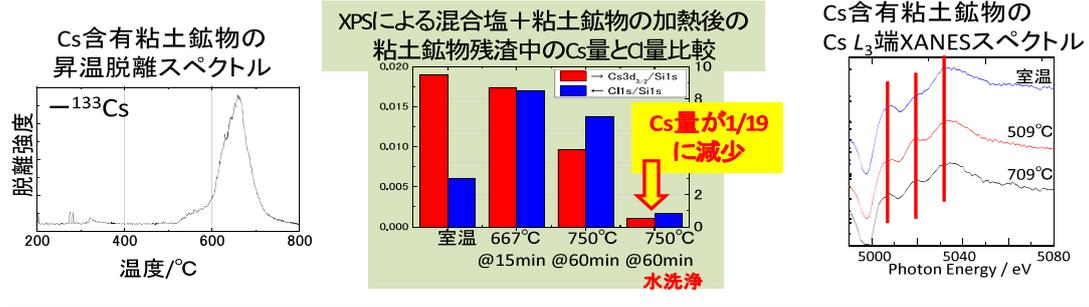


土壤廃棄物からのCs脱離研究(原子力・福島関連研究)

真空加熱処理による粘土鉱物からのCs脱離: アルカリ溶融塩プロジェクト

研究の背景: 東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い環境中へ大量の放射性セシウムが放出され、土壌中の粘土鉱物に吸着したため、現在その除去や捕集が重要な課題となっている。そこで、福島のと土壤成分に多い粘土鉱物中の効率的なCs乾式除法の確立を目指し、真空加熱処理とアルカリ溶融塩を組み合わせたセシウムの効率的脱離法の検討を行う。

これまで: Csを吸着した粘土鉱物の昇温脱離スペクトル測定に成功し、放射光によるXPS・XANES測定からNaCl/CaCl₂混合によるCs脱離温度低下を確認する。



計画: 昇温脱離装置の高感度化 → 超高真空チェンバーの導入
¹³³Cs以外(H₂O、CsOH等)の脱離挙動を同時観察 → 多重質量分析計の導入
 脱離による重量変化・反応熱の測定 → 真空示差熱分析装置を導入
 微量のCs化学結合状態 → 高感度蛍光XANES、全反射XPS・XANESの開発
 → 溶融塩の組成や加熱条件を最適化することにより、より低温での効率的なCs脱離を目指す。

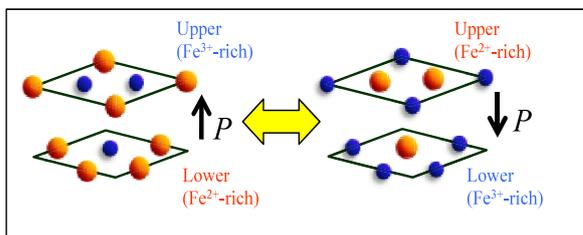
5

マルチフェロイック材料の応用研究(材料・物性研究)

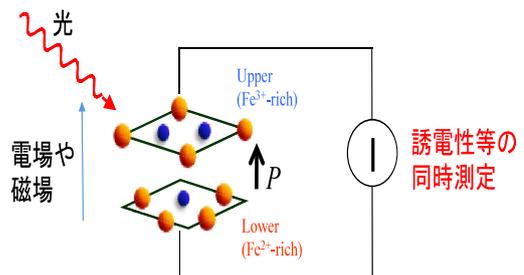
その場観察システム高度化によるマルチフェロイック物質を用いた新規エネルギーデバイスの開発

例) 電子強誘電体RFe₂O₄系

Fe²⁺-Fe³⁺の電子の交換で分極反転



その場観察システム概念



- 放射線の照射による静電エネルギー取り出しの効率化
- マルチフェロイック性により多様な環境でのエネルギー回収材料を開発

磁場・電場・放射線場での構造、電子状態の時間分解測定→材料のFine Tune

マルチフェロイック材料のためのDXAFSシステムの高度化 (ダイハツとの共同開発)

6

水素再結合触媒実用化研究(原子力・福島関連研究)

研究開発の内容

背景と目的

福島第一原子力発電所のデブリ等の放射性廃棄物の貯蔵時に発生する水素の処理、及び稼働中の原子力発電所の設計基準事故(DBA)やシビアアクシデント(SA)時の水素処理のため、電源を必要としない自動車触媒を利用した受動的な水素再結合触媒(PAR)システムを開発する。

成果の概要

本研究はエネ庁受託事業の一部である。これまでのところ、室温からの触媒反応開始の確認、水蒸気、ガンマ線照射、ヨウ素等の被毒の影響を評価し、特許出願準備中である。本年中には試作機的设计完了及び製作着手し、来年度に欧州の研究所との協力の下、実機試験を行う予定である。

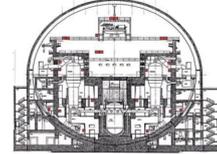
具体的研究概要

OSpring-8のJAEA専用ビームラインに設置した時分割XAFS装置により得られる原子間距離や電子状態などの局所構造パラメータにより、触媒反応メカニズムを解明し、PARシステム設計に情報をフィードバックする。

原子力関連施設における水素安全対策高度化



福島第一のデブリ等、廃棄物保管時のPAR装置



DBA、SA時に対応したPARシステム

自動車触媒を利用した高性能PARシステムの構築



※PAR装置に関しては特許出願準備中

○「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(水素安全対策高度化)」(H24-27年度)は9機関の産学官連携プロジェクトであり、本PAR分科会はダイハツ、川崎重工との共同で実施。

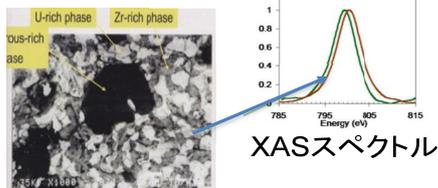
7

高分解能STXMおよびHAXPESのR&D(放射光技術の開発)

Scanning Transmission X-ray Microscope (STXM)の導入



STXM装置@ALS(LBNLとの技術協力協定)



TMIデブリ
元素分布と電子状態に関する情報を得ることが可能。理論解析との組み合わせが極めて有効。



実験室光源によるHAPESを開発(光源はVGシエンタと共同開発)。この装置を放射光に移設。

顕微表面オペラント分光分析



より実条件に近い状態でXPSスペクトルの取得(オペラント測定)が可能となる。

8

第3期中期計画における4つの研究コア

アクチノイド化学

目的: アクチノイドなど重元素に特異な化学結合、構造特性の解明から、燃料、廃棄物処分に資する有用な材料開発、反応解析を実施する。

次期中期での重点: *d, f* 電子系化学結合特性解明、高インパクト配位子、高感度化学センサー、Cs廃棄物減容化技術開発

アクチノイド認識材料
アクチノイド溶液反応化学

環境・構造物性

目的: 物質の結晶構造と電子系の動的性質を放射光で「その場」観察することにより、機能発現のメカニズムを解明し(基礎)、更に高機能な材料開発に資する(応用)。特に、その研究手法を環境・エネルギー・安全問題の解決に向けて適用することを目指す。

次期中期での重点: 水素再結合触媒、燃料電池、脱貴金属(元素戦略)、エネルギー効率利用化研究(超伝導、マルチフェロ材料)、表面科学(触媒、デバイス)

環境材料、機能性材料

電子構造物性

目的: アクチノイド化合物やその関連物質の電子構造を明らかにし、これらの化合物の物性発現機構源を明らかにする。ここでの分光実験技術を福島復興支援研究や原子力エネルギー研究に応用する。

次期中期での重点: フェルミオロジー、*f* 電子系超伝導(以上超ウラン元素に拡大)、(U,Th)置換型化合物への実験の展開、Cs減容化技術開発のための電子構造解析、汚染水と構造材との相互作用の研究

*f*電子系元素物性
アクチノイド燃料特性

溶液・融体化学

目的: 乾式再処理、ガラス固化体、溶媒抽出分離系などランダム媒体における金属および金属錯体の短、中、長距離秩序、分布を解明するとともに、廃棄物処分の安全性にかかわる基礎的知見を得るための研究を実施する。

次期中期での重点: 高温融体、溶液超分子構造解明などイオン反応場制御、中性子とX線の相補的利用、ガラス固化体状態、高次構造錯体、地層処分

ランダム系構造解析
ガラス、溶液特性

9

各研究テーマ説明資料

10

研究テーマ名： アクチノイド化学研究(アクチノイド科学研究)

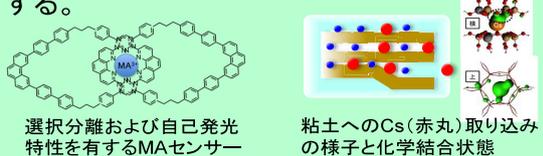
研究のねらい アクチノイドなど重元素に特異な化学結合、構造特性の解明から、燃料処理、廃棄物処分に資する有用な有機材料開発、反応解析を実施する。

これまでの実績

- ・キュリウムなどマイナーアクチノイドの5f電子の化学結合への共有結合的相互作用に基づく関与を明らかにし、芳香族系窒素などのランタノイドからのアクチノイドの分離試薬の開発に成功した。
- ・時間分解XAFSなどの解析からセシウムの粘土鉱物への取り込み過程、化学結合の特徴を明らかにし、廃棄物減容化に資する有用な知見を得た。

実施する研究開発

放射性廃棄物減容化に向けた高インパクトマイナーアクチノイド(MA)分離抽出剤の設計・開発および高度化に資するMA錯体の構造・電子状態、錯形成ダイナミクスに関する解析研究を実施する。減容化を目指した粘土鉱物へのCs吸脱着機構解明研究を実施する。



選択分離および自己発光特性を有するMAセンサー

粘土へのCs(赤丸)取り込みの様子と化学結合状態

達成目標

- ・高インパクトMA抽出剤の基礎特性解明と実用化に向けた高度化研究の実施。
- ・錯形成ダイナミクス観察システムの構築。
- ・Cs廃棄物減容化に向けた基盤研究の実施。

最終的なアウトカム

- ・高レベル放射性廃棄物の減容化。
- ・福島 of 土壌廃棄物の安定保管および30年後の減容化の実現。
- ・アクチノイド錯体化学を通じた人材育成。

高度化、利用する量子ビーム施設

SPring-8, KEK PF, ALS (USA), SLS (Swiss), Diamond (UK), JRR-3, J-PARC

11

研究テーマ名： 電子構造物性研究(アクチノイド科学研究、放射光技術開発)

研究のねらい 量子ビームを利用した先端的な分光により、アクチノイド化合物やその関連物質の電子構造を明らかにし、これらの化合物の物性発現機構源を明らかにする。ここでの分光実験技術を福島復興支援研究や原子力エネルギー研究に応用する。

これまでの実績

- ・遍歴5f電子系から局在5f電子系に至るウラン化合物に対して角度分解光電子分光実験を実施することで、それぞれのバンド構造が遍歴・局在描像のどちらで理解できるかを示した。
- ・磁性ウラン化合物に対するX線吸収磁気円二色性測定から元素・電子軌道選択的な磁化過程の詳細を明らかにした。

実施する研究開発

アクチノイド化合物とその関連物質の物性発現機構を明らかにするため、放射光を利用した光電子分光やX線吸収等のX線分光実験により電子構造を研究する。ここでの放射性物質に対する分光実験技術をCs吸着粘土鉱物や原子炉生成物等の電子構造解析に応用することで福島復興支援研究や原子力エネルギー研究に資する。

達成目標

- ・(U,Th)置換型化合物への実験の展開
- ・測定対象を超ウラン化合物に拡張
- ・顕微分光による微小領域電子構造解析
- ・Cs減容化技術開発のための電子構造解析

最終的なアウトカム

- ・放射性物質の電子構造解析技術の確立により、原子炉のシビアアクシデント時の生成物やその飛散状況等の予測に役立てる。
- ・Cs吸着粘土鉱物のCs吸着状態の解明により効果的なCs減容化技術の実現に資する。

高度化、利用する量子ビーム施設

SPring-8(硬X線光電子分光装置や顕微分光装置のビームラインへの導入)

12

研究テーマ名： 環境・構造物性研究(材料・物性研究、原子力・福島関連研究)

**研究の
ねらい**

物質の結晶構造と電子系の動的性質を放射光で「その場」観察することにより、機能発現のメカニズムを解明し(基礎)、更に高機能な材料開発に資する(応用)。特に、その研究手法を環境・エネルギー・安全問題の解決に向けて適用することを目指す。

これまでの実績

- ・自動車触媒に使用されている貴金属の自己再生機能を解明し、大量の貴金属使用量を削減を成功させた。更に、脱貴金属触媒を実現した。
- ・電子秩序による新しいメカニズムに由来する「電子強誘電体」を提案し、マルチフェロイック系物質として、室温での磁場による誘電性の制御に成功した。
- ・燃料電池の電極反応における助触媒の機能を解明し、白金使用量の削減と高効率化に指針を与えた。

実施する研究開発

種々の高度化された放射光測定技術を活用し、Csの土壤汚染(環境)、水素爆発防止(安全)、燃料電池システム(エネルギー)等を中心にして、メカニズム解明に基づく問題解決を図る。



達成目標

- ・種々の粘土鉱物とCsの相互作用の解明
- ・高湿度、高放射線場、CO雰囲気での水素再結合触媒反応のメカニズム解明
- ・播磨、高崎、東海の連携及びダイハツ工業との共同による高性能燃料電池の開発

最終的なアウトカム

- ・福島 of 土壤廃棄物の減容化
- ・水素再結合触媒PARシステムの国産化
- ・白金を使わない、液体燃料を使用する、燃料電池自動車の実用化

高度化、利用する量子ビーム施設

SPring-8、KEK PF、JRR-3、J-PARC、HANARO(韓国)、FRM-II(ドイツ)、SAGA Light Source

13

研究テーマ名： 環境・構造物性研究 (材料・物性研究)

**研究の
ねらい**

放射光顕微表面オペランド分光分析を開発し、高性能デバイスや燃料電池など最先端技術の開発に直結する表面・界面機能の解析と探索を行い、イノベーション創出に向けた諸問題の解決に挑戦する。さらに、Cs土壤汚染などの環境問題を吸着形態の研究という物理化学の基礎的視点で捉え直し、その解決に貢献する。

これまでの実績

SPring-8において放射光リアルタイム光電子分光および走査プローブ顕微鏡などの複合表面反応分析を可能にし、分子ビーム技術を組み合わせて半導体表面の酸化機構を明らかにした。この知見をナノテク支援などを通じて産業応用上重要な表面反応に応用し、多くの共同研究に成功した。

実施する研究開発

前中期で培った研究リソースに、新たに実環境下(オペランド)での顕微表面分光分析を実現する。準大気圧で動作可能な顕微光電子分光装置、ピンポイント放射光照射技術、実環境観察セルなどを体系的に研究開発し、新イノベーション創世に直結する材料プロセスを対象に、その表面機能の解明と探索を内外の研究者と連携して行う。さらに、Cs除染などの直面する環境問題の解決に向けた各種利用研究にも挑戦する。



達成目標

- ・放射光顕微表面オペランド分光分析の開発
- ・次世代電子材料の表面機能に関する研究
- ・ソフトな水素除去とスマート電源を目指した燃料電池の表面触媒機能の研究
- ・土壤Cs除染に向けたCs吸着形態の研究

最終的なアウトカム

顕微表面オペランド分光分析が実現すれば、これまで未開であったナノスケールのデバイス作成や触媒機能発現中の表面の詳細な情報が分かるので、それらの機能を活かしたイノベーション創出に貢献できる。また、土壤微粒子中のCsの存在形態を実環境で非破壊分析できるので、除染などの環境問題の解決にも大いに役立てることができる。

高度化、利用する量子ビーム施設

大型放射光施設(SPring-8)および高エネルギー加速器研究機構(PF)などの国内外の放射光施設

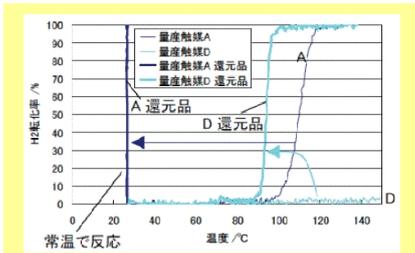
14

研究テーマ名： 環境・構造物性研究（原子力・福島関連研究）

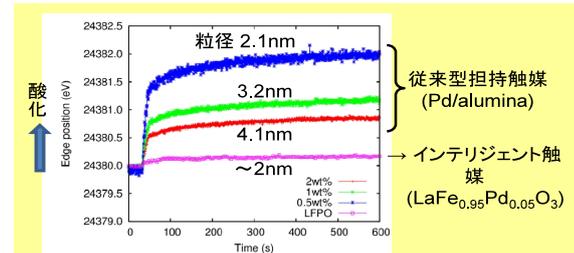
水素再結合触媒実用化研究

発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(水素安全対策高度化)
資源エネルギー庁(平成24年12月～平成28年3月(4年間))

目的: 原子力施設の電源喪失を伴うシビアアクシデントに対応した水素処理システムの開発、及び放射性廃棄物貯槽内で発生する水素の処理システムを開発する。



量産触媒A(インテリジェント触媒)の還元処理品は室温から高活性である。



Pdは酸素過剰雰囲気では、表面酸化膜の薄いインテリジェント触媒が室温から高活性であることが理解された。

本年度までの成果: 水素再結合反応の「その場」観察の実施、活性エネルギー評価、システム適用対象選定など。今後の予定: 水蒸気、ヨウ素、CO、ガンマ線等の影響評価と反応メカニズムの解明、実用システムの設計・評価。

15

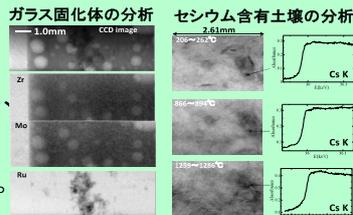
研究テーマ名： 溶液・融体科学研究（原子力・福島関連研究）

研究のねらい

再処理工程における溶液系の反応、高レベル廃液のガラス溶融固化、吸着材を使用した放射性物質の回収など溶液・融体の関与する反応系の放射光分析を行う。高エネルギーQXAFSや放射光イメージングXAFSを高度化し、次世代のガラス固化体や福島廃棄物の処理へ貢献する。

これまでの実績

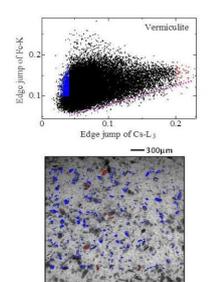
放射光イメージングXAFS分析技術を確立するとともに、ガラス固化体分析および福島環境試料分析へ活用した。



実施する研究開発

放射光分析技術の高度化を図り、次世代再処理ガラス固化技術に欠かせない新組成ガラスと廃棄物成分元素の相関挙動を解明する。これらのノウハウを生かし、福島廃棄物のガラス固化処理へ活用の幅を広げる。

2元素間の分布相関と化学的相関の解明



達成目標

- 高エネルギーQXAFSとイメージングXAFS分析法の高度化(高速化と高精密化)による原子力分野での構造化学研究の展開
- 次世代ガラス固化体の放射光分析を通して、その健全性の評価を実施し、開発へ貢献
- 溶液高次構造解明、放射光と中性子の相互利用

最終的なアウトカム

次世代再処理ガラス固化技術の確立
福島廃棄物のガラス固化処理への応用
高次イオン認識反応場の設計手法確立

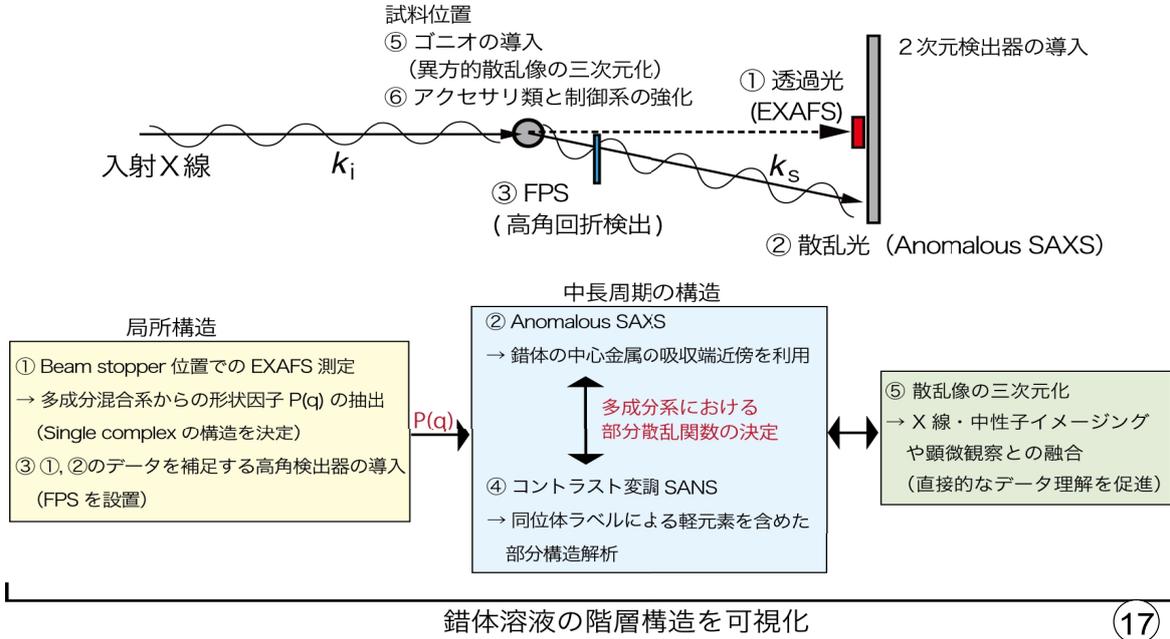
高度化、利用する量子ビーム施設

高エネルギー加速器研究機構放射光研究施設 BL-27B
大型放射光施設SPRING-8, SNS(ORNL, USA), JRR-3 SANS-J, J-PARC他

16

研究テーマ名： 溶液・融体化学研究(原子力・福島関連研究、放射光技術開発)

放射光における透過光 (EXAFS) と散乱光 (Anomalous SAXS) の同時測定と中性子散乱におけるコントラスト変調法の適用で錯体溶液の階層構造を探索



17

研究テーマ名： 粘土鉱物中のセシウムの存在状態の解明(原子力・福島関連研究)

粘土鉱物中でのCsの化学結合状態の研究

Cs含有粘土鉱物研究の背景

要請 ・ 放射性Csを含む土壌の減容化

対応 ・ 化学結合状態の解析

・ 非放射性的モデル試料

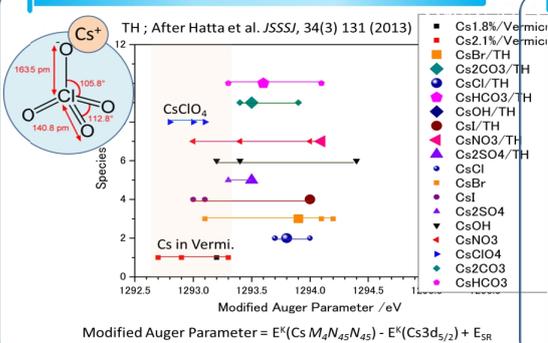
→ X線光電子分光(ESCA)の適用

→ Csを吸着させた粘土鉱物(パーミキュライト)

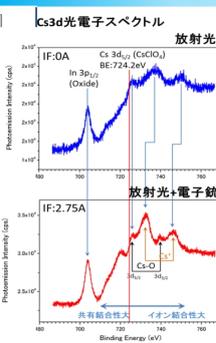
パーミキュライト中のCsはCsClO₄と類似した化学結合状態にある。

パーミキュライト中のCsの高分解能XPSスペクトル測定が可能に。

オージェパラメータ解析の結果



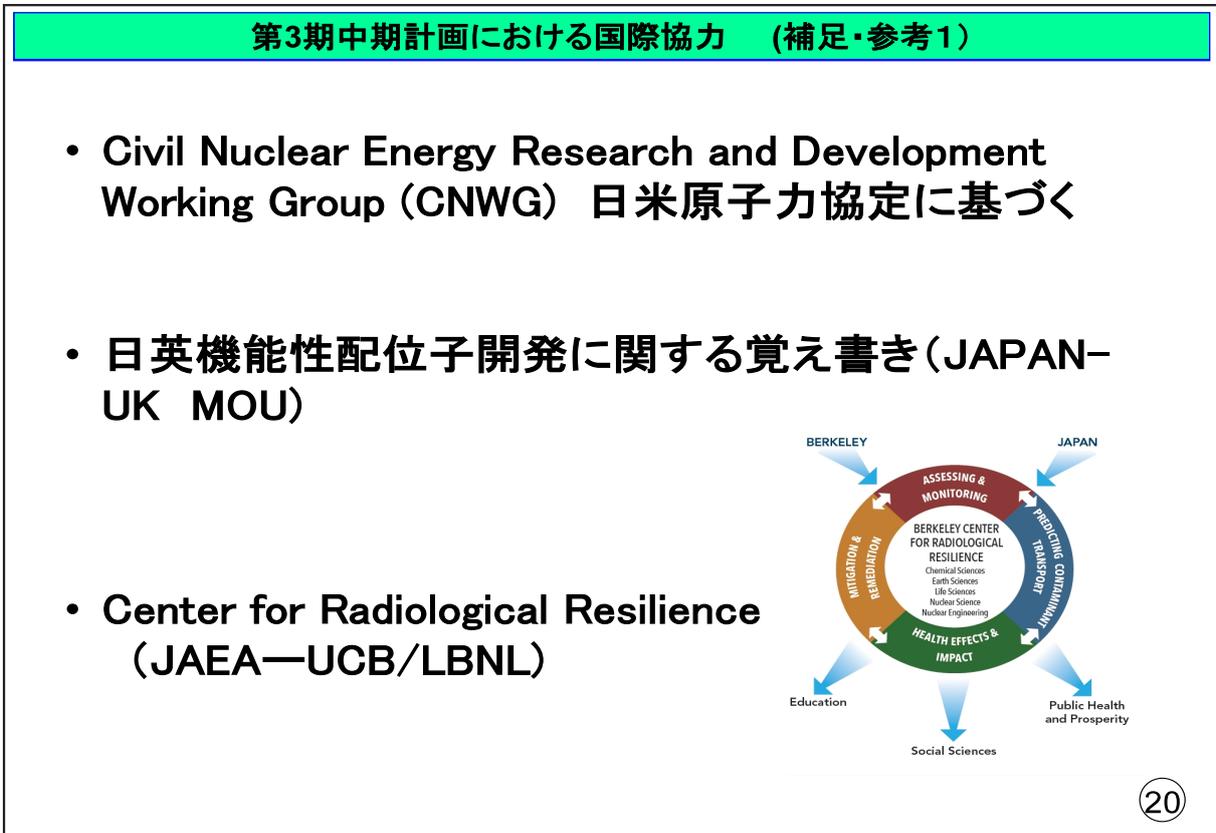
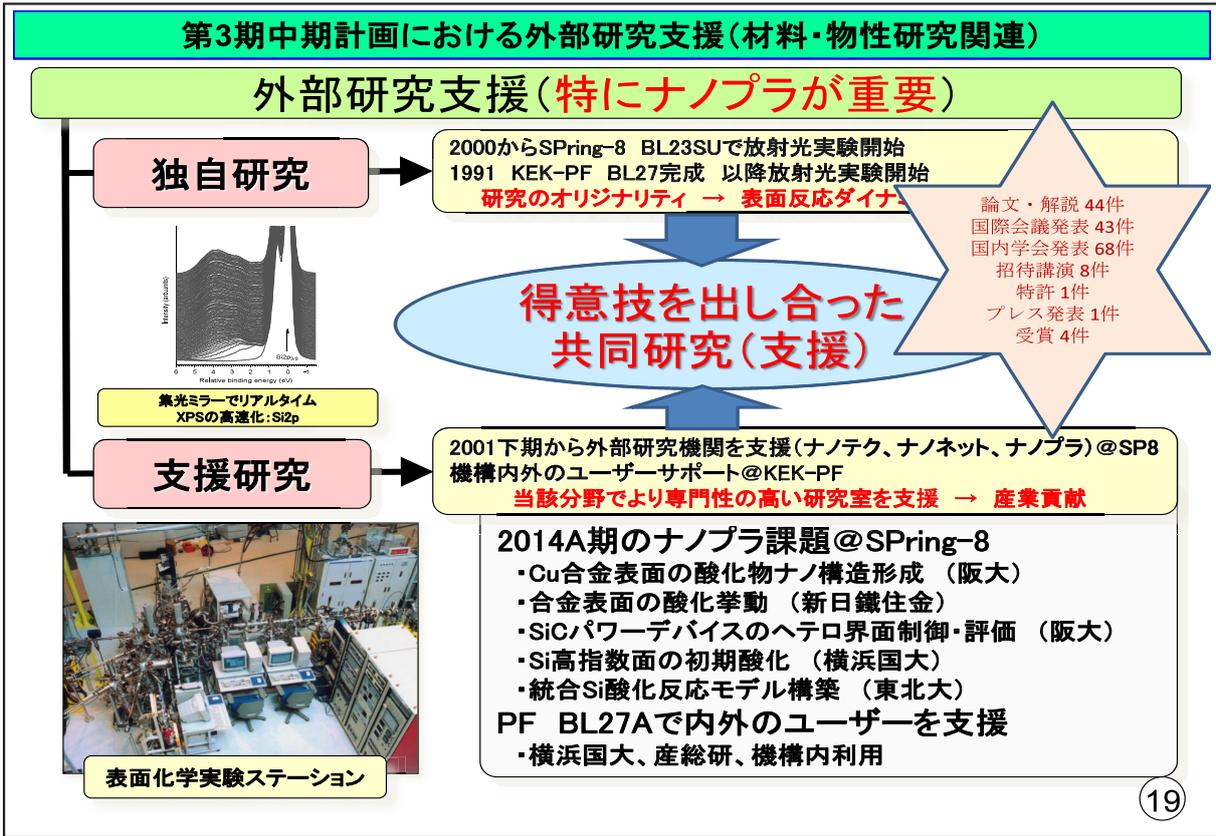
チャージアップ効果 (Csの部分帯電)



- (1) In 2p (In₂O₃)
・放射光のみではチャージングなし
・電子銃でもシフトなし
- (2) Cs 3d
・見かけ上敏感に電子銃シフト
- (3) Cs 3d 2つの成分
・Cs⁺ → 最もイオン結合性大
広いケイ酸塩層間で水和?
・Cs-O → 狭いケイ酸塩層間
- (4) 電子銃シフト
・最もイオン結合性の大きなCs⁺だけ (Mg²⁺も電子銃シフトあり)

今後：
・ 帯電抑制法の探索 (Auコート、Gコート、イオン液体、Ar原子ビーム)
・ パーミキュライト以外の粘土鉱物でのCs吸着状態の解析と比較検討

18



第3期中期計画における人材育成計画 (補足・参考2)

- 連携大学院制度 兵庫県立大、東工大、筑波大、東北大他
- 講師活動
- 特別研究生制度、学生実習生、学振PDなど受け入れ
- 国際協力に基づく若手の人材交流

This is a blank page.

付録 3

- 事前評価結果の概要
- 第 3 期中長期計画に向けた期待・課題と措置

This is a blank page.

事前評価 評価結果の概要

1. 量子ビーム応用研究の推進方針について

<p>評価結果</p>	<p>次期中長期計画における量子ビーム応用研究の研究開発の基本方針については、機構の強みである量子ビームの優れた機能を総合的に活用する観点から研究計画を策定しているとともに、科学技術イノベーション創出に向け、最終的なアウトカムを明確にして目標を定めており、妥当と言える。次期中長期計画においても、そのミッションの重要性に鑑み、各種量子ビームの先端性とその応用技術の発展させ、それらの複合的・横断的利用を積極的に推進すべきである。</p> <p>機構は、希少な大型量子ビーム施設・設備を保有し、我が国の量子ビーム研究を担う先端研究機関である。特徴的な先端量子ビームの応用技術の発展させ、その利用研究を幅広い分野に展開する量子ビーム応用研究関連部署のミッションの重要性は、我が国において益々高くなっている。今後の取り組みに注目するとともに、量子ビーム応用研究の今後の発展に大いに期待する。</p>
-------------	--

2. 研究計画について

<p>評価結果</p>	<p>各研究計画は、全体的に妥当である。それぞれの研究ユニットが自らの強み・特長を活かした計画を立てたことは評価できる。機構改革等で、組織・体制等については不透明な部分があるが、外部機関との連携、適切な人的配置、及び研究テーマの重点化等により、次期中長期計画期間中に研究目標が達成できることを期待する。以下に各ユニットの個別研究に関する評価結果を示す。</p> <p>○量子ビーム機能性分子解析技術研究（医療・バイオ応用領域）</p> <p>タンパク質の中性子構造解析技術の高度化は重要である。中性子の特長を活かして水素・水和水を考慮に入れた研究手法は適切で、がんの構造解析による新規抗がん剤の開発等、目的も明確である上、方向性、達成目標、最終的な出口も明示されており、研究計画は妥当である。J-PARCの新しい生体高分子用の回折装置については、多くの研究者が期待している。今後は、既存の中性子回折装置に加え、新規装置を有効に活用して、中性子構造解析に関する技術開発等を積極的に推進して欲しい。</p> <p>○量子ビーム材料評価・構造制御技術研究（物質・材料領域）</p> <p>中性子の特長を活かした研究開発は妥当である。また、JRR-3の定常中性子とJ-PARCのパルス中性子との相補的利用による研究開発に取り組み姿勢は適切である。東海地区に設置されている両施設の定常及びパルス中性子を最も効果的に利用できる立場にあるので、これらの相補利用を積極的に展開して欲しい。また、独自の研究と研究支援の関係を明確にし、独創性の高い研究を行うべきである。JRR-3等の施設供用について、メリハリをつけて取り組むという方針は適切である。また、装置の維持管理・供用面だけでなく、独自研究においても、優れた成果の創出を期待する。</p>
-------------	---

<p>○医療・バイオ応用量子ビーム技術研究 (医療・バイオ応用領域) 最先端の放射線技術を用いて取り組む研究課題は、現在、医療・バイオ分野で高いニーズがある。多彩な照射施設を用いる機構の強みも活かしている上、研究方針も明確であり、かつ最終的な出口も明示されており、研究計画は妥当である。重点分野の一つとして挙げられている農業応用関連研究については、積極的に推進して欲しい。特に「核農学」というキーワードは革新的で非常に重要な提案である。これまでの実績を基盤に、各種量子ビームを有効に活用した研究開発を進めることで、所期の目的が達成しうると期待できる。</p> <p>○環境・産業応用量子ビーム技術研究 (環境・エネルギー領域) 選定された研究テーマは、共同研究・施設供用等の実績を踏まえている上、計画も機構内の連携等についてよく練られており、妥当である。量子情報処理から福島対応、廃炉対応まで広い視野でイオンビームの活躍する場が考えられており、優れた成果の創出が期待できる。スピンドラフト電子ビームに関する技術開発は、革新性が高く、方向性は妥当と言えるが、ターゲットとする先端材料が幅広い分野（エネルギー、半導体、医療、資源回収）にわたっており、重点的な課題を明確にして精力的に推進し、革新的成果の早期創出を目指して欲しい。</p>	<p>○荷電粒子・RI 利用技術開発 (先進ビーム技術領域) ビーム生成・加速・制御技術、計測及び照射技術の開発は、様々な応用研究に有効な基盤技術であるとともに、量子ビームの複合的利用を念頭にして、利用者の視点に立った研究開発となっており、妥当と言える。ユーザーズオフィスも、次期中期計画で新規に設置することは有意義である。具体的な課題を認識して、テーマ設定しているが、ニーズに関しては、既存ユーザーだけでなく、新規・外部ユーザーの分も拾い上げるような取り組みも行う必要がある。</p> <p>○先進ビーム技術研究 (先進ビーム技術領域) 我が国で唯一のフェムト秒超短パルス超高強度レーザーを有する研究組織として、レーザーの高性能化、利用研究を目標とすることは妥当である。また、J-KAREN-P の早急な完成と利用研究への開放を期待する。核変換断面積に関わるデータ取得、高強度レーザー技術の高度化、X線レーザーによる微細構造観測技術の開発等は、必要性が高いテーマと言える。特に、パワーレーザーの更なる高強度化は、レーザー駆動粒子線の加速能を向上し、それらを使った核物理、超短パルスを使った超高速現象の解明、加速器に替わる極短パルスのX線発生装置の開発等に繋がっていくことが期待できる。</p> <p>○レーザー応用技術研究 (環境・エネルギー領域) 研究計画は、放射性廃棄物処理技術、非破壊核種分析技術、極短パルスレーザーによる光制御技術の研究等、必要なテーマを選定していることに加え、基礎から応用まで明確なビジョンを提示しており、目標達成の可能性も高く、妥当と言える。特に、レーザー量子制御法による同位体分離に関しては、セシウム 135 (Cs-135) のみの核変換が実現すれば、大変価値が高く、革新的と言える。こうした福島復興対応での重要課題の1つである長寿命各種の分離技術の確立・実用化について、このユニットへの期待は大きい。同位体分離に関して、現在開発中の高輝度ピコ秒パルス列及び QUADRA-T におけるテラヘルツ (THz) パルス制御研究に注力することは、重</p>
--	--

	<p>要課題の1つである。</p> <p>○原子力・産業応用レーザー技術開発（環境・エネルギー領域） 地元企業等との連携、福島廃炉への貢献等、必要な具体的テーマを掲げており、妥当である。革新性が必ずしも高いとは言えないが、ニーズの高い、重要な課題を選定していること、既存の技術を産業応用につなげる考え方も妥当であり、その必要性は高いと評価できる。原子力施設の保守・保全や福島廃炉技術等に係る技術開発を目指しており、成果の有効利用が期待できる。</p> <p>○量子ビーム物性制御・解析技術研究（物質・材料領域） 研究開発の大きな方向性として掲げられているオペランド材料評価、極限環境下測定等の研究テーマの選定は、概ね妥当である。世界最速の歪、形状計測技術が確立すれば、その意義は大きく、実用水素吸蔵合金のオペランド計測も、着実に進めるべきである。人員に制限がある中、ビームラインの特長を活かし、測定の空間スケールの拡大を主として技術開発を実施していくことは妥当と言える。一方で、これらの研究テーマのアウトカムへの寄与が明確ではなく、研究の進め方が不透明である点が気がかりである。個々のテーマが有機的につながり、補完しあうことで、社会への貢献に結び付けられることを望む。</p> <p>○量子ビーム反応制御・解析技術研究（環境・エネルギー領域） アクチノイド化学、環境・構造物性、電子・構造物性、溶液・融体化学の4つの主題の位置づけ、相互の関係が明確であり、妥当な課題設定をしており、マイナーアクチノイド分離用化合物の設計、粘土鉱物からのCs脱離に関するテーマも独創的である。放射光・中性子の特長を活かした研究であり、その研究目標と放射光技術の高度化の両方が達成可能と期待できる。国内外の研究機関との連携、地区間の連携も密接に行っており、妥当である。アクチノイド化学の研究を実施できる放射光施設を目指しており、この分野の基礎を支える中核的研究拠点となることが大いに期待される。</p>
--	---

第3期中長期計画に向けた期待・課題と措置

第3期中長期計画に向けた期待・課題	対応
<p>○量子ビーム応用研究は、第3期中長期計画においても、そのミッションの重要性に鑑み、各種量子ビームの先端性とその応用技術を発展させるとともに、これまで培ってきた成果を土台に、センター内外との連携を強化し、各種量子ビームの複合的、横断的利用を積極的に推進する必要がある。</p>	<p>○第2期中長期計画においては、各地区を横串で通した組織体制を構築し、地区間の連携強化を図ることにより、量子ビームの複合的・横断的利用を推進し進めた。それらは、数多くの学術論文公開、プレス発表、実用化・製品化、並びにベンチャーの設立等に繋がる優れた研究成果の創出として結実した。次期中長期計画においても、こうした量子ビームの複合的・横断的利用を継続するとともに、量子ビームサイエンスアンドテクノロジの更なる発展・普及に向けた取り組みを推進していく。</p>
<p>○機構は責任を持って、量子ビーム応用研究のミッション遂行に必要な人材と経費のリソースの確保を第3期以降も継続すべきである。充分なリソース確保は今後も困難と予想され、予算・人員が年々減少している厳しい状況ではあるが、次期計画においても、量子ビーム施設の安定・継続的な運転、及び量子ビーム応用研究のミッション遂行に最大限努力すべきである。</p>	<p>○研究成果の最大化を目指し、共用促進事業等の外部資金確保や大学をはじめとする外部研究機関との連携強化等を積極的に進め、施設を定期的に運転し、研究開発を着実に進展させる。</p>
<p>○限られた予算・人員を効果的に活用して、研究成果を効率的に創出するため、量子ビーム応用研究センター全体を俯瞰した研究マネジメント体制を確立し、研究テーマの重点化・メリハリをつけることに配慮すべきである。短期的・中長期的な課題、目標達成の可能性、アウトカムの重要性等に基づき検討や機構外専門家からの研究諮問・助言等を通して研究課題の選択と集中を判断する等、適切な研究マネジメントに留意すべきである。</p>	<p>○次期計画においては、「科学技術イノベーション総合戦略」等、政府が打ち出した基本政策を踏まえ、出口を意識した社会的ニーズの高い研究開発を主に実施していく計画である。研究開発の遂行においては、予算・人員等の研究資源の状況を踏まえつつ、科学的・技術的意義や社会的ニーズ、研究評価委員会の意見等を総合的に勘案して、研究テーマの重点化を行う等の研究マネジメントを実践し、革新的成果の効率的創出を目指す。</p>
<p>○トップダウンとボトムアップとの効果的な融合、及び研究員個々の士気の向上は、組織を円滑に機能させる上で重要である。これに加え、若手人材の育成に留意した運営体制・研究実施体制の構築等を含む組織マネジメントをしっかりと実施すべきである。</p>	<p>○センター長による研究現場のヒアリングや研究交流会・成果報告会の開催等により、組織上層部と若手をつなぐ各階層間での意見交換・交流を促進し、トップダウンとボトムアップの融合を推進することに加え、科研費等の外部資金獲得、国際会議等における成果発表・普及、機構内外の研究者との連携協力等を奨励し、若手研究者が新しい課題に積極的に挑戦すること</p>

<p>○第2期中期計画においては、多くの研究が、量子ビーム応用研究センター内、各サイト間で水平展開されてきたが、第3期においては、その研究をさらに発展させて欲しい。そのために、各量子ビームと研究ユニットの持つ特性、個性をうまく活用し、センター外との連携を、より積極的に取り込んだ階層的・垂直的展開を図る必要がある。</p> <p>○陽電子施設の整備等、新規量子ビーム施設の整備やSPRING-8IIを見据えたビームラインの高度化等については、我が国の研究開発における重要な共通基盤である量子ビームプラットフォームの維持・強化に資するものであり、着実に進める必要がある。一方で、こうした量子ビーム施設の安定・継続的な運転は、機構の責務であり、人的配置や維持費の確保にも努力されたい。</p> <p>○JRR-3の重要性は、これまで創出された成果からも論を待たず、またJ-PARCのパルス中性子とJRR-3の定常中性子の相補利用が非常に有効であることは、米国オークリッジ研究所や欧州における定常炉とパルス中性子施設との密接な関係からも明らかである。大学、産業界等からのJRR-3の早期再稼働を求める強い声に鑑み、今後も運転再開に向け、最大限の努力を続けるべきである。また、JRR-3再稼働後については、装置の維持管理、供用業務だけでなく、独自研究の精力的推進による優れた成果の創出を期待している。</p> <p>○量子ビーム応用研究の新法人移管に当っては、研究リソースを公平かつ適切に機構から新法人に配分するとともに、移管後も両機関の間で緊密な連携・協力関係を構築すべきである。</p>	<p>とを促す環境・雰囲気づくりに努めていく。</p> <p>○中性子、放射光に代表される先端材料解析ツールとイオンビーム、電子線等の材料加工・改質ツールを総合的に活用した研究開発に、センターの総力を挙げて取り組むとともに、量子ビーム応用や材料開発・評価に精通する外部研究機関との間で、共同研究・施設共用等を基盤とする連携・協力を一層強化・推進していく。</p> <p>○機構の量子ビームプラットフォームを形成する量子ビーム施設・設備の高度化・拡充、継続的・安定的な運転は、量子ビーム応用研究センター、関連拠点の重要ミッションであり、今後とも積極的に取り組んでいく。また、必要な予算・人員については、機構内関連部署との相談・協議を通して、その確保方策の検討と実践に努めていく。</p> <p>○JRR-3は、機構だけでなく、大学・産業界にとっても重要な研究施設であると理解しており、今後関係部署と連携協力し、早期再稼働に向けた取り組みに尽力していく。また、再稼働後のJRR-3の運用については、予算・人員等のリソースに応じて最大限の成果を出せる仕組みを考案していくとともに、より適切な研究課題を選定・遂行し、社会にインパクトを与えるような優れた成果の創出を目指していく。</p> <p>○平成26年11月13日付理事長メッセージに示されているように、機構の資源・インフラ等の分配配分は公平に行う方針の下、検討を進めている。また、研究連携・協力に加え、各種研究インフラの相互利用や人事交流などの円滑な推進等のため、両機関の緊密な連携の枠組みを構築していく。</p>
---	---

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光線	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間は同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

