

光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発

「光・量子融合連携研究開発プログラム」  
の中間評価結果

光・量子融合連携研究開発プログラム  
プログラムオフィサー

平成 28 年 3 月

# 目次

「光・量子融合連携研究開発プログラム」概要	1
事業実施体制	2
中間評価プロセス	2
中間評価-総合評価	2

## 各課題の概要および中間評価票

(1)「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題-6 課題	
①. 高原課題	
「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」	3
②. 篠原(新井)課題	
「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」	7
③. 三木課題	
「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」	11
④. 足立課題	
「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」	15
⑤. 瀬戸課題	
「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」	19
⑥. 町田課題	
「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」	23
(2)「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」課題-3 課題	
⑦. 辛課題	
「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」	27
⑧. 照沼(浦川)課題	
「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」	31
⑨. 大竹課題	
「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」	35

国家課題対応型研究開発推進事業

光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発

# 「光・量子融合連携研究開発プログラム」 概要

H20－H29

「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」

H20－H24

「量子ビーム基盤技術開発プログラム」

**H25－H29**

**「光・量子融合連携研究開発プログラム」**

## 【事業の目的】

我が国の科学技術全体を支える基盤技術である「光・量子ビーム技術」においては、先導的な技術開発や利用研究を分野間融合を含めた様々な可能性へのチャレンジにより、境界領域を開拓していくことが期待されている。

そのため本事業では、

(1) 光・量子ビーム技術の連携を促進し、我が国の有する施設・設備を横断的に活用する先導的利用研究と、

(2) 将来を俯瞰した基盤技術開発を推進することで、

課題解決に向けた研究開発を強化し、開発の成果を社会に還元するとともに、将来の利用研究の礎とすることを目指す。

## 【課題の目標】

### (1) 「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題－6課題

我が国が直面する課題解決や産業競争力の強化につながる先導的研究開発の推進に貢献することを視野に入れ、事業終了までに、**複数の光・量子ビーム技術を横断的利用した最先端の研究を実施し、革新的な材料開発や新薬の開発等につながる新たな原理解明等の成果を創出するとともに、その成果を、グリーン・ライフイノベーション創出を目指した世界トップレベルの研究開発につなげる**こと。

- ①. 高原課題 「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」
- ②. 篠原（新井）課題 「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」
- ③. 三木課題 「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」
- ④. 足立課題 「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」
- ⑤. 瀬戸課題 「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」
- ⑥. 町田課題 「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」

### (2) 「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」課題－3課題

開発した技術により高度化・小型化した装置・機器等を活用し、グリーン・ライフイノベーション創出に貢献する光・量子ビーム技術の横断的利用研究が行われることを視野に入れ、事業終了までに**実用化を想定した要素技術開発等を行い、加速器等基盤装置やレーザー等研究装置の高度化・小型化等を実現**すること。

- ⑦. 辛課題 「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」
- ⑧. 照沼（浦川）課題 「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」
- ⑨. 大竹課題 「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」

## 事業実施体制

総括プログラムオフィサー（総括PO）： 家 泰弘 日本学術振興会・理事  
プログラムオフィサー（PO）： 井上 信 京都大学・名誉教授  
森井 幸生 放射線利用振興協会・参与

## 中間評価プロセス

平成 27 年 8 月末日 課題代表者から「課題中間評価 報告票」提出  
「課題中間評価 報告票」を基に総括PO、POによる書類審査を実施  
平成 27 年 10 月末日 課題中間評価ヒアリング審査を実施  
平成 28 年 1 月 中間評価結果案とりまとめ  
平成 28 年 3 月 科学技術・学術審議会 先端研究基盤部会  
量子科学技術委員会にて報告、議論

## 中間評価-総合評価

以下の 4 段階にランク付け

- S：所期の目標・計画を達成するとともに、想定以上の成果が得られており、かつ今後の展望も優れている。
- A：所期の目標・計画を概ね達成するなど、想定通りの成果が得られており、かつ今後の展望も妥当である。
- B：所期の目標・計画の達成状況が十分でないなど、想定を下回る成果であるが、改善の見込みがある。
- C：所期の目標・計画の達成状況が十分でなく、改善の見込みが薄い。

(1)「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題-1

①. 高原課題

「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」  
の概要

1. 課題実施機関・体制

研究代表者 九州大学 高原 淳

代表機関 九州大学

参画機関 京都大学、東京大学、北九州市立大学、高輝度光科学研究センター（JASRI）

2. 課題の概要・目的

○我が国の高分子を中心とするソフトマテリアル産業は、高機能性分野で世界をリードし貿易収支に大きく貢献すると同時に、中韓との激しい開発競争に晒されている。今後の発展が期待されるグリーンイノベーション分野で我が国の優位性を維持するには、触媒や重合方法を中心とした合成プロセス、素材の構造解析、成形加工過程を俯瞰的かつ連続的に定量化する必要がある。このためには、高分子材料の特徴である時間的にも空間的にも揺らいでいる階層構造を明らかにし、それを分かりやすく可視化し、材料開発にフィードバックする必要がある。本事業では、放射光の散乱・分光と中性子の散乱・反射率測定量子ビーム連携を行い、散乱・分光測定結果の可視化技術に基づくソフトマテリアルのグリーンイノベーションを目指す。

○具体的な対象材料は、高次構造形成過程解明によるリサイクル可能で軽量かつ耐熱性を有する次世代オレフィン樹脂、微細孔の構造制御による安全なリチウム2次電池用ポリオレフィン系セパレーター、ナノ粒子階層構造とエネルギー保存・散逸機構の解明による画期的な省エネタイヤ、炭素繊維/マトリクス高分子界面の構造を精密制御した軽量高強度の航空機・自動車用炭素繊維強化複合材料、エマルジョン重合プロセスの改良により合成した環境調和型フッ素系高分子材料とし、これらを開発するための製造プロセスに貢献することを目的とする。

3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	76,739	70,364	79,116		

①. 高原課題 「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」 【開始時】

課題内容

・放射光と中性子の量子ビーム連携による散乱・分光測定に基づきソフトマテリアルを時間・空間・階層的に可視化する技術を創出し、可視化技術に基づくグリーンイノベーションを目指す。

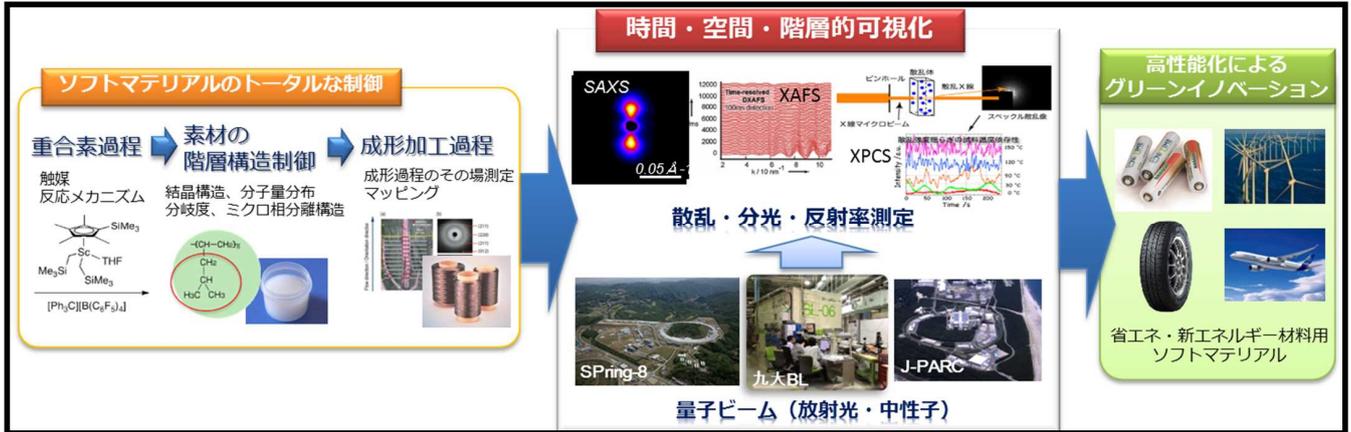
目標

・高分子材料の特徴である、時間的にも空間的にも揺らいでいるソフトマテリアルの階層構造を量子ビームを駆使して明らかにし、材料開発にフィードバックすることで高性能化の為に材料設計指針を明らかにする。

期待できる研究成果

・量子ビームを用いた高分子の合成プロセスの解析の確立、高分子材料の時空間階層構造解析手法の確立。  
・高次構造制御によるリサイクル可能で高強度な次世代オレフィン樹脂、安定性の高いリチウム2次電池用セパレーター、画期的な省エネタイヤ、界面構造制御による軽量高強度の炭素繊維強化複合材料、環境調和型反応プロセスによるフッ素系樹脂の実現。

(代表機関)	
九州大学	高原 淳
(参画機関: 4 機関)	
京都大学	金谷 利治
東京大学	雨宮 慶幸
北九州市立大学	櫻井 和朗
JASRI	高田 昌樹



①. 高原課題 「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」 【評価時】

成果 共役系高分子の重合反応機構解明、分子鎖凝集構造と機能との相関関係の解明

・新規に九州大学ビームラインに設置したXAFS装置を用いて3-ヘキシルチオフェンと塩化鉄微粒子混合系の重合反応機構の解明を進め、反応溶媒の選択により、塩化鉄は触媒として機能することを初めて見出した。  
・ペリレンジミド含有高分子薄膜の分子鎖凝集構造評価を行い、薄膜内部の分子鎖凝集構造がメモリー機能に対して大きな影響を及ぼすことを見出した。

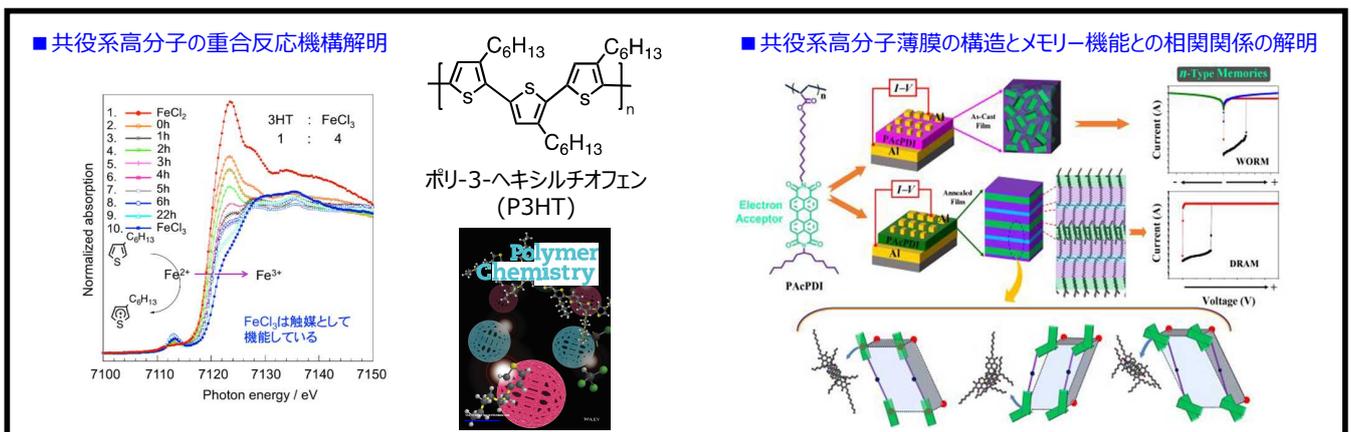
課題の中の位置づけ

・本成果は低環境負荷の重合触媒の開発、材料の低環境負荷で高性能材料を創製する上で非常に有効であるため、課題の中心的な位置づけとなる。

本成果の展開、波及効果など

・XAFS測定により発見された反応過程の触媒循環は、効率的な低環境負荷重合プロセスによる高性能材料開発に極めて有効である。明らかにした反応機構を分子設計にフィードバックすることで、構造制御された共役高分子P3HTの合成が可能になる。  
・新規n型共役高分子薄膜の階層構造を微小角入射広角X線回折 (GIWAXD) により明らかにし、新規な有機メモリー素子を実現した。

(代表機関)	
九州大学	高原 淳
(参画機関: 4 機関)	
京都大学	竹中 幹人
東京大学	雨宮 慶幸
北九州市立大学	櫻井 和朗
JASRI	木村 滋



## 中間評価票

<b>1. 課題名 「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」</b>
<b>2. 総合評価：A</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>・高分子化学研究者のネットワークを活かして、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター（SAGA-LS）、SPring-8、J-PARC などのビームラインを整備活用して成果を挙げてきており、国際的にも成果が高く評価された。</li><li>・SAGA-LS や SPring-8 のビームラインにおいて、触媒反応その場解析や時空間階層構造測定や 1<math>\mu</math>m ビームを使った高分解能構造評価が可能となるなど、高分子の評価手法の開発が順調に進んでいる。各研究グループのソフトマテリアル研究が進み始めたので、今後の研究進展が期待できる。</li><li>・各研究グループの研究テーマの独立性が高い現状にあると思われるので、プロジェクト全体としての研究戦略的な筋書きの構築を図る必要がある。</li><li>・研究開発は着実かつ順調に進捗している中、社会の様々な場面で利用されるソフトマターの学理の追究とともに、表題として掲げた「グリーンイノベーション」に向けて材料研究への画期的な貢献を望む。</li></ul>
<b>3. 観点別評価</b>
<b>(1) 課題の進捗について</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>・SAGA-LS 九州大学ビームライン（BL06）の小角散乱（SAXS）・広角回折（WAXD）システムに、高感度かつリアルタイム検出が可能な高速 2 次元 X 線検出器を、また X 線吸収微細構造（XAFS）測定システムに、蛍光 X 線高感度検出器を導入し、BL06 での XAFS・SAXS 測定系の高度化を進めた。</li><li>・SAGA-LS の BL06 および SPring-8 の測定装置の整備が進み、高分子合成の触媒反応機構の解明やメモリー材料の階層構造解明など順調に成果を挙げている。また中性子準弾性散乱およびミュオンスピン緩和法によるゴム材料の動特性観察、X 線マイクロビームによる炭素繊維の構造評価など先進的手法の開発も進んでいる。</li><li>・学会やシンポジウムでの成果発表も活発に行われ、発表論文数は 46 件と多く、国際的評価も高い。外部への発信は研究者を対象とするものが主である。</li><li>・SAGA-LS の BL06 における XAFS による触媒反応その場解析、SPring-8 でのマイクロビーム超小角 X 線散乱（<math>\mu</math>USAXS）、透過型 X 線異常小角散乱（ASAXS）による時空間階層構造測定、1<math>\mu</math>m ビームを使った高分解能構造評価が可能となるなど、高分子の評価手法の開発が順調に進んでいる。それと並行して、各研究グループのソフトマテリアル研究が進み始めた。</li></ul>

## (2) 研究体制について

- ・全体会議や外部有識者を招いた研究会等を通じて、研究の進展とともに研究代表者を中心とした情報共有・連携が進展しており、緩やかながら適切なマネジメントが機能している。
- ・瀬戸課題「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」との合同研究会を持ち、共通課題に関して連携しているほか、試料となる材料の開発等に関して企業等との連携を行っている。
- ・大学の若手研究者の参加が多く、人材育成面でも貢献している。

## (3) 今後の展望について

- ・グリーンイノベーションの観点から注目されるタイヤの研究等は社会的インパクトも大きいことからシンボリックな意味合いもあり、優れた成果の創出と発信に努めていただきたい。
- ・各研究グループの活動が高まって研究成果が出てくるものと期待される。各研究グループの研究テーマの独立性が高いと思われるので、プロジェクト全体としての纏めの目標・キーワード、研究戦略的な筋書きの構築を図る必要がある。また、産業界との連携を形あるものにして頂きたい。
- ・高分子化学分野は研究能力の高い企業が多く、研究代表者を中心とした産学の研究連携は成果の社会への還元に関しても有効に機能すると期待される。

## (4) その他

- ・特になし

(1)「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題-2

②. 篠原(新井)課題

「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による  
革新エネルギー機器の実現」の概要

1. 課題実施機関・体制

研究代表者 日本原子力研究開発機構 (JAEA) 新井 正敏 (H25～H27.3)  
日本原子力研究開発機構 篠原 武尚 (H27.4～現在)  
代表機関 日本原子力研究開発機構  
参画機関 北海道大学、東京都市大学、トヨタ自動車、日立製作所、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

2. 課題の概要・目的

○パルス中性子を用いた分光イメージング法により、従来の中性子ラジオグラフィの技術ではなしえなかった、動作環境下での実用製品中の「熱、元素、構造、磁場」等の物理特性の空間分布を直接観察する技術を開発・実用化し、その利用研究を通じて、高効率、高性能な製品の開発に貢献することを目的とする。また、X線イメージングとの併用だけでなく、ミュオンビームを相補的に活用した元素分析能力と定量性の高精度化により、中性子・ミュオン・X線を複合的に利用した高度な観察技術を確立し、実用製品への利用研究を通じて、製品の性能向上に向けた改善点の提案を目指す。

3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度 (予定)

4. 予算 (執行額) の変遷

年度	H25 (初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額 (千円)	80,000	73,400	79,000		

②.篠原(新井)課題 「実用製品中の熱・構造・磁気・元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」【開始時】

課題内容

・パルス中性子分光イメージングとミュオン、X線を相補的に利用し、実用エネルギー関連製品中の熱・構造・磁場・元素情報を直接観察。

目標

・中性子分光イメージングに基づく製品の観察技術開発。  
・2次電池・モータ等のエネルギー関連機器の性能向上。

期待できる研究成果

・実用製品を稼働状態で評価し、直接観察することにより、機器の性能向上・性能劣化原因の解明等、製品状態での課題解決に貢献。  
・パルス中性子・ミュオン・X線を活用したイメージングに基づく計測技術を実用化し、新しい量子ビーム利用研究を開拓。

(代表機関)	
JAEA	新井 正敏
(参画機関: 5機関)	
北海道大学	加美山 隆
東京都市大学	持木 幸一
トヨタ自動車	吉澤 章博
日立製作所	高口 雅成
KEK	三宅 康博

**実用製品中の熱・構造・磁場・元素の直接観察**



**2次電池**

イオン移動、組成変化、凝集・偏析、**局所発熱**  
結晶粒・構造変化

**燃料電池**

液体流動  
**局所発熱・冷却**

**モーター、トランス**

**局所発熱**  
構造変化  
局所ひずみ  
**漏洩磁場**

パルス中性子分光イメージング・X線・ミュオンビームの相補利用  
⇒ **エネルギー利用の高効率化**  
**社会インフラのグリーン化 に貢献**

②.篠原(新井)課題 「実用製品中の熱・構造・磁気・元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」【評価時】

成果 モデルモーター内部磁場の観察に成功

・偏極中性子を用いてモデルモーターの回転子・固定子間の空隙に発生する実際の磁場分布を可視化し、磁石の特性劣化を示唆する結果を得た。

課題の中の位置づけ

・実用製品の直接観察の一つとして実施している、電気モーターの高効率化を目指したモーター内部磁場分布の可視化研究の成果である。本成果により、設計値と実際に発生する磁場との間に差異があることが明確となり、この違いの原因を追究することで、製品の高度化へ展開する。

本成果の展開、波及効果など

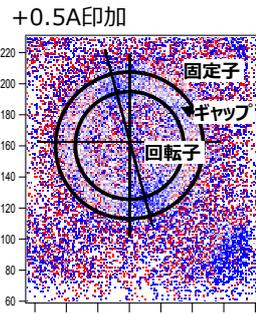
・本成果により、モーターの設計効率の向上、高効率モーター開発への貢献が期待され、トランス等の他の磁場関連機器への応用展開も現実的になってきた。  
将来的には標準的な診断・評価技術まで発展する可能性がある。

(代表機関)	
JAEA	篠原 武尚
(参画機関: 5機関)	
北海道大学	加美山 隆
東京都市大学	持木 幸一
トヨタ自動車	吉澤 章博
日立製作所	堀田 尚二
KEK	三宅 康博

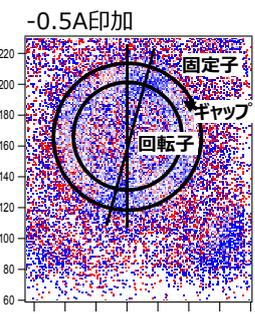
■モデルモーター内部の磁場分布可視化技術を開発



+0.5A印加



-0.5A印加



±0.5A印加時の偏極中性子透過像

**実験**

±0.5Aの印加電流で  
磁場が±15°回転

↑↓ 不整合

±10Aの印加電流で  
磁場が±3°回転

**計算**

回転子を構成する磁石の加工劣化により固定子との合成磁場が変化している？

## 中間評価票

1. 課題名 「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」

2. 総合評価：B

- ・J-PARC 中性子ターゲットの不具合のために実験遂行上の支障があったものの、装置・技術の開発および試験的な実験遂行を目指す当初計画は概ね計画通りに進んでいる。特に、新しい技術である磁場イメージング法によるモデルモーターの磁場分布測定において、大きな進展があった点を高く評価する。実用機器の温度分布、元素分布、ひずみ分布等の観察手法についても、基礎的技術開発に成功しており、中性子ビームが再供給され、また強度が増強されるに伴って今後の成果が期待できる。
- ・それぞれのテーマの研究開発は進んでいるが、各チームがそれぞれ試行錯誤を続けている面もあり、全体としての目標達成への行程が見えにくい。
- ・これまでに一定の成果は挙がっているが、代表者交替に伴い研究期間後半に向けた取り組みを加速するために再委託先も含めて研究グループ全体の現状認識と意思統一を再確認することが望まれる。「使える中性子イメージング」に向けて、有望な手法に注力することも検討して良いのではないかと。

3. 観点別評価

(1) 課題の進捗について

- ・J-PARC 中性子ターゲットの不具合のために実験遂行上の支障があったものの、装置・技術の開発および試験的な実験遂行を目指す当初計画は概ね計画通りに進んでいる。
- ・ブラッグエッジ法による複相鉄鋼材料の定量評価および温度評価、共鳴吸収法による元素分析、温度計測の精度検証、偏極中性子を用いた磁場イメージングによる交流磁場計測技術開発などに進捗が見られる。特に、新しい技術である磁場イメージングによるモデルモーターの磁場分布測定においては、シミュレーション結果との違いをもたらす原因を議論する段階まで進んだ点は高く評価できる。
- ・パルス中性子イメージング装置「RADEN」やミュオンによる元素分析などの実験環境の整備が進んだが、目標である実用製品中の直接観測という面では試行錯誤が続いている。他の成果に対するより具体的、定量的な記述が望まれる。
- ・発表論文は 13 件で大きなチームの割には多いとはいえないので、今後の成果取得に対して論文発表に力を入れて欲しい。

## (2) 研究体制について

- ・今年度当初に研究代表者の交代があったが、産学の連携は強く、研究者間の情報共有・連携体制が効果的・効率的に機能している。日本を代表する2社の熱心な取り組みに期待が持てる。年1回の全体会議やTV会議によって課題内の連携や議論は活発に行われている。
- ・代表者交替以降、新たな代表者のイニシアチブがこれまでのところ見えにくい。HPの更新がなされていないなど、広報に対する取り組みが不足している印象が拭えない。
- ・課題内のテーマが個別的であるためか、各課題と研究代表者間の情報交換はあるものの、課題全体としての情報共有の場が十分とはいえない。研究代表者マネジメントそのものは適切であるが、よりリーダーシップを発揮する必要がある。企業が参加してJ-PARCを利用するという面での連携は進んでいるが、日本原子力研究開発機構(JAEA)が開発した専門技術の提供を伴う研究連携という面では、さらなるJAEA側の努力が望まれる。

## (3) 今後の展望について

- ・「磁場イメージングに基づくモデルモーターの評価において、実験結果と磁場計算によるシミュレーション結果の間の違いがあることが明らかとなり、解析の結果これはモーターの回転子の形状に伴う磁気特性の劣化に起因する可能性がある」という点は事実であれば中性子イメージングならではの情報となるので、早急に真相を突き止めることが望まれる。
- ・研究代表者の交代があったので、リーダーシップのあり方も変化があると思われるが、多くの人が集まっているだけでバラバラに各自のテーマについて研究しているのでは連携の効果は薄い。中心機関が明確な指針を示し、場の提供だけではなく自ら中心となる技術を持ってそれを軸として活用しつつ連携による相乗効果によって成果を挙げることを期待する。
- ・当課題で開発された新しい技術が実用機器に適用できると期待される。新しく整備された専用実験装置「RADEN」において更に技術開発が進み、実用機器の磁場分布、温度分布、元素分布等が非破壊的に観測できることとなると期待でき、産業界に与えるインパクトは大きいと思われる。
- ・「実用製品の直接観察は実験や結果の解釈の難しさのために試行錯誤が続いており・・・」との自己評価について、そのハードルを乗り越える方策をユーザーサイドとの密接な連携により見出すことを期待する。
- ・全体会議(あるいはサブグループ間の研究連絡)の頻度を上げるなど、積極的な取り組みが望まれる。

## (4) その他

- ・ミュオン、中性子プローブ利用の相乗効果を示してほしい。大竹課題「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」との共通課題があるので、連携協力が望まれる。

(1)「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題-3

### ③. 三木課題

## 「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」 の概要

### 1. 課題実施機関・体制

研究代表者 京都大学 三木 邦夫

代表機関 京都大学

参画機関 日本原子力研究開発機構（JAEA）、兵庫県立大学、大阪市立大学、北海道大学、  
大阪大学、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、熊本大学

### 2. 課題の概要・目的

○タンパク質は生命体の主要要素であり、光合成や呼吸における電子伝達反応、生命を維持するための酵素反応など、ほとんどすべての生体内化学反応の担い手となる重要な物質である。従って、その作用メカニズムの解明は、生命科学の発展への貢献のみならず、バイオ材料や医薬品などへ応用にも極めて重要である。一方、水素はタンパク質を構成する原子のおよそ半分を占め、その機能や物性に密接な関わりがあるにもかかわらず、従来のX線構造解析による水素の決定には、技術的な困難があった。また、水素原子の可視化に有効な中性子線解析においても、限られた利用機会や分解能の低さのため、タンパク質の構造・機能解明には十分な成果が得られたとは言いがたい。本研究では、J-PARCにおけるタンパク質用中性子ビームラインの充実、中性子線と放射光X線との連携利用による高分解能解析技術基盤の整備を行うとともに、それによって、タンパク質を用いる新たな産業展開のために、水素原子の構造情報や分子の電子状態が機能解明に重要である光合成や呼吸に関わるタンパク質や創薬ターゲットとなるタンパク質を研究対象として、中性子と放射光という二つの量子ビームの連携利用に基づくタンパク質の高精度解析の技術基盤の確立を目的とする。併せて、生命科学研究者の量子ビームの複合利用を促進する。

### 3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

### 4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	75,000	68,800	79,000		

③. 三木課題 「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」 【開始時】

**課題内容**

・量子ビーム（中性子と放射光）の複合的利用の拡大・支援のための技術（解析対象タンパク質試料の重水素化・大量作製技術、結晶の大型化技術）開発を行う。

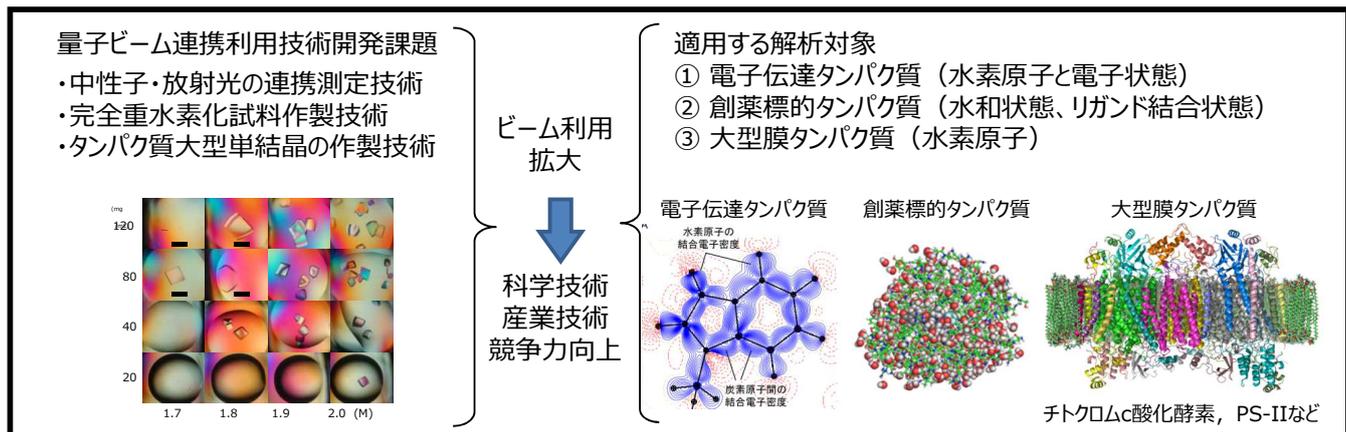
**目標**

・化学反応プロセスに関与する水素原子や電子状態の直接観測の実現。  
 ・タンパク質の水和構造・リガンド結合構造の観測実現。  
 ・膜タンパク質大型結晶による中性子回折実験の実現。

**期待できる研究成果**

・水素原子や電子状態の直接把握による構造生物学の革新、学術界・産業界の生命科学研究者の構造研究への参加の拡大・支援により、革新的なバイオ材料・医薬品開発に貢献する。

(代表機関)	
京都大学	三木 邦夫
(参画機関: 7 機関)	
JAEA	黒木 良太
兵庫県立大学	月原 富武
大阪市立大学	神谷 信夫
北海道大学	姚 関
大阪大学	中川 敦史
KEK	千田 俊哉
熊本大学	山縣 ゆり子



③. 三木課題 「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」 【評価時】

**成果 世界最高精度でのタンパク質結晶構造解析**

・光合成の電子伝達タンパク質である高電位鉄イオウタンパク質HiPIPについて、高エネルギー放射光を用いた超高分解能構造解析で、金属タンパク質として世界最高分解能（0.48Å）の構造解析・精密化を行った。  
 ・J-PARCでの中性子回折においても世界最高分解能（1.1Å）での回折データが測定でき、水素を完全に可視化した。

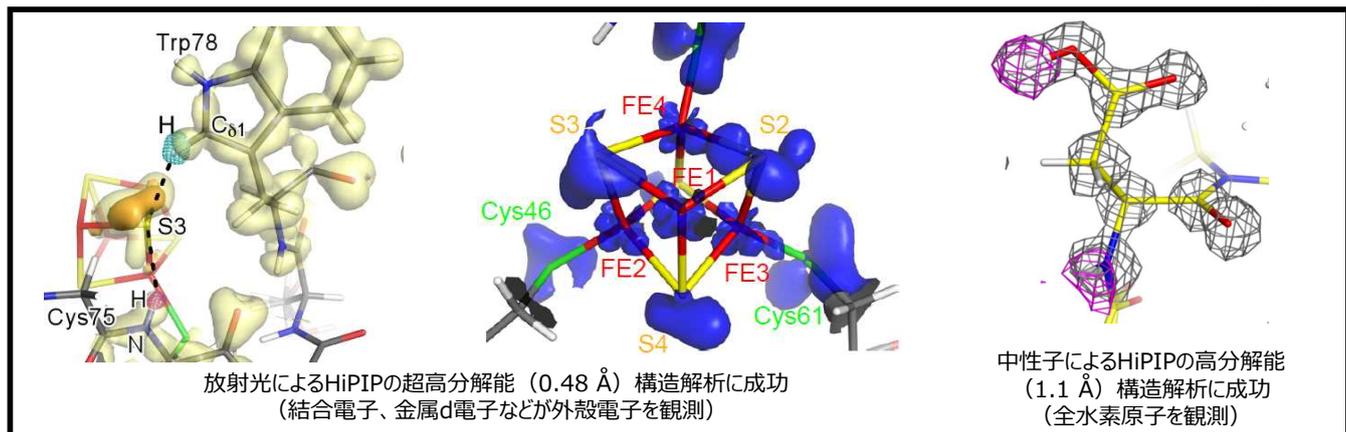
**課題の中の位置づけ**

・中性子・放射光の連携による基盤的高分解能解析技術を確立した。

**本成果の展開、波及効果など**

・タンパク質における水素原子や電子状態の直接把握による構造生物学の革新。（量子構造生物学の創成）  
 ・学界・産業界の生命科学研究者の構造研究への参画拡大による革新的なバイオ材料・医薬品開発に貢献。

(代表機関)	
京都大学	三木 邦夫
(参画機関: 7 機関)	
JAEA	玉田 太郎
兵庫県立大学	月原 富武
大阪市立大学	神谷 信夫
北海道大学	姚 関
大阪大学	中川 敦史
KEK	千田 俊哉
熊本大学	山縣 ゆり子



## 中間評価票

<p>1. 課題名 「中性子と放射光の連携利用によるタンパク質反応プロセスの解明」</p>
<p>2. 総合評価：S</p> <p>・中性子回折によるタンパク質構造解析の成否を握る大量調製、大型結晶化、重水素化等の技術、および中性子回折データ取得の高度化について大きな進展が見られ、研究期間終了までに大きな成果につながるものと期待できる。</p> <p>・J-PARC 中性子ターゲットの不具合やビームライン整備の遅れなど、本課題チーム外の要因で期待通りに進めることが困難な面もあるが、チームがこれまでに取り組むとしていたことに関しては目標を上回る成果を得ている。</p> <p>・放射光と中性子との連携利用によってタンパク質高精度解析の技術的基盤確立のために日本のエキスパートがチームを組んで取り組んでおり、中性子回折でのネックとなってきた大型結晶育成と高分解解析において大きな進展があった。今後の研究進展が大いに期待できる。</p>
<p>3. 観点別評価</p> <p>(1) 課題の進捗について</p> <p>LED 搭載型培養装置の作製によって好熱性光合成細菌の大量培養を可能にして反応中心複合体 (RC) および電子輸送に関与する高電位鉄イオウタンパク質 (HiPIP) の大量精製条件を確立し、大腸菌による HiPIP の大量発現系の構築により収量を約 10 倍にするなど、代表者の expertise が十分に発揮されている。重水素化技術についても新たな知見が得られている。</p> <p>・J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の BL03 (iBIX) で <math>1.4\text{\AA}</math> 分解能を超える高分解能中性子回折データの取得に成功するなど、X 線回折と相補的な中性子回折の有効性を実証する取り組みが進んでいる。</p> <p>・中性子回折実験に不可欠なタンパク質の大型結晶づくりに関して、ほとんどの対象タンパク質の大量調製を可能にし、結晶化が困難な膜タンパク質複合体などの結晶化にも成功した。また測定精度に関しても、放射光による <math>0.5\text{\AA}</math> の分解能での解析および中性子による <math>1.1\text{\AA}</math> の分解能での解析という世界最先端の成果を得た。発表論文数は 29 件で、シンポジウム、ワークショップも開催するほか、日本学術振興会のアウトリーチ活動などにも参加している。</p> <p>・中性子回折実験を狙って、巨大膜タンパク質であるチトクロム C 酸化酵素 CcO、がん治療標的タンパク質であるヒト大腸菌 MutT ホモログ:ヒト MTH1、電子輸送に関与する高電位鉄イオウタンパク質 HiPIP、等の大量調製法の開発と mm サイズ大型結晶育成に成功した。さらに、HiPIP では世界最高の <math>1.1\text{\AA}</math>、MTH1 では <math>1.7\text{\AA}</math>、CcO では <math>6\text{\AA}</math> の分解能で中性子回折データの取得に成功して構造解析が進んでいる。放射光による構造解析では、HiPIP で <math>0.48\text{\AA}</math> の超高分解能解析に成功し、ペプチド結合や側鎖置換基の結合電子、酸素の非結合電子対、鉄 d 電子の分布などの解析を行うなど、研究の増々の進展がみられる。これらの研究進捗、特に中性子解析についてはこのプログラムで急速に進展しており、高く評価する。</p>

## (2) 研究体制について

- ・年1回の全体会議の他、サブグループ間の直接研究連絡も密に行われているようであり、研究マネジメントは適切に行われている。研究成果発表や外部への情報発信も盛んである。
- ・今後は個々の再委託先においてもそれぞれが研究対象とする高分子の大型結晶化の取り組みを加速すべく、技術情報の共有化に努めていただきたい。
- ・課題の全体会議は年1回程度であるが、参加者の共同研究が多いため研究打合せは頻繁に行って情報共有している。全国の主な構造生物学研究者が研究代表者のリーダーシップのもとで連携して研究を進めている。参加研究者が JST・CREST など本プログラム以外のプログラムにおいて共同研究を行っている場合など、他のプログラムの研究者等との連携も行われている。また、年1度の研究会に加えて外部への情報発信も目立っている。大学の若手など人材育成面の努力は見られるが、予算運用面での制約を感じているようである。

## (3) 今後の展望について

- ・中性子回折によるタンパク質構造解析の成否を握る大量調製、大型結晶化、重水素化等の技術、および中性子回折データ取得の高度化について大きな進展が見られ、研究期間終了までに大きな成果につながるものと期待できる。
- ・タンパク質結晶の大型化に成功し、J-PARC における既存の中性子ビームラインのデータ処理法の改善も進みつつあるので、SPring-8 での超高分解能構造解析の利用とともに、タンパク質の構造と反応機能に関する研究が一段と進むと期待される。現在 J-PARC では茨城県のビームライン BL03 (iBIX) がタンパク質結晶の測定ができる唯一のビームラインであるが、タンパク質専用のビームラインが新設されれば飛躍的な発展が期待されるので、早期実現を望みたい。
- ・放射光を使った研究進展には何の心配もない。中性子ビームを使った研究では、次々と育成に成功している大型結晶を使って更に構造解析が進むものと期待できる。既存の中性子ビーム実験装置の改善を行ってより良い回折データを得て、放射光 X 線と中性子ビームの特長を活かした構造解析と生命現象の化学反応プロセス解明を大いに進展させて頂きたい。

## (4) その他

- ・J-PARC において大分子量タンパク質構造解析専用の中性子回折装置が建設されることを期待する。

(1)「複数の光・量子ビーム技術の横断的利用研究」課題-4

#### ④. 足立課題

### 「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」 の概要

#### 1. 課題実施機関・体制

研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 足立 伸一

代表機関 高エネルギー加速器研究機構

参画機関 自然科学研究機構→大阪大学、東京工業大学（理学系研究科、工学系研究科）、  
首都大学東京

#### 課題の概要・目的

○レーザーと放射光の連携によりピコ秒からフェムト秒オーダーの光反応ダイナミクス精密計測プラットフォームを形成し、触媒化学、光化学、材料科学分野の研究者との緊密な協力体制の下で共同研究を推進することにより、太陽光エネルギーの化学エネルギーへの変換における有望な光触媒材料の開拓に向けた研究開発を行うことを目的としている。光水分解反応による水素発生及び二酸化炭素還元反応の機構を放射光により直接解明することにより、精密計測科学の立場から高効率な光触媒反応系の構築に貢献する。

#### 2. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

#### 3. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	75,000	68,800	75,500		

④. 足立課題「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」【開始時】

課題内容

- ・レーザーと放射光の連携による光反応ダイナミクス精密計測を構築する。
- ・触媒化学、光化学、材料科学分野と緊密に協力する。

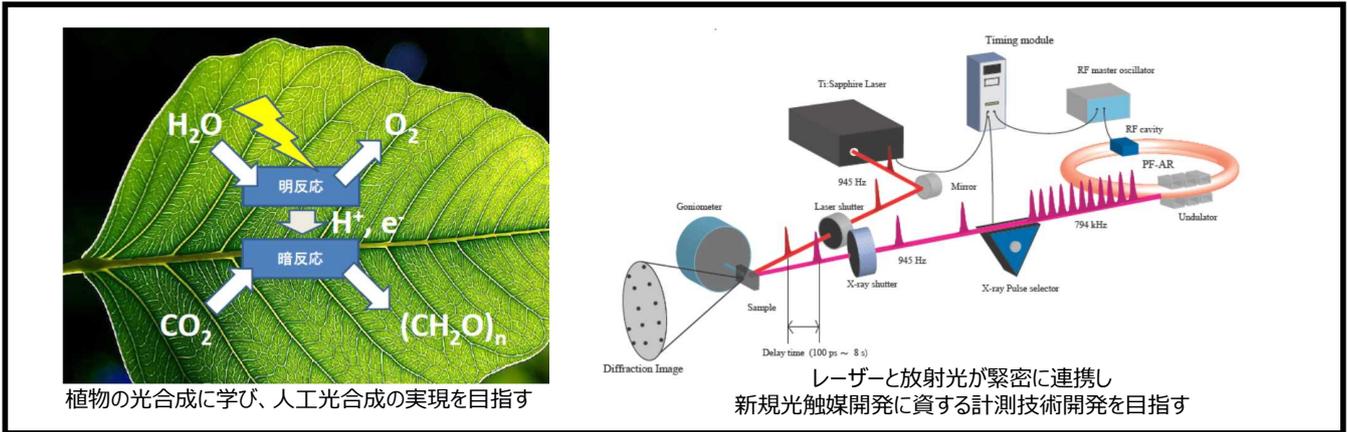
目標

- ・光エネルギーの化学エネルギーへの変換における有望な光触媒材料の開拓に向けた計測技術開発を行う。

期待できる研究成果

- ・計測結果を新たな光触媒開発へフィードバックし、高効率な新規光触媒開発に関する指針を得る。

(代表機関)	
KEK	足立 伸一
(参画機関: 4 機関)	
自然科学研究機構	木村 真一
東京工業大学 (理)	石谷 治
東京工業大学 (工)	大友 明
首都大学東京	井上 晴夫



④. 足立課題「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」【評価時】

成果 人工光合成光触媒が実動作している瞬間の精密測定に成功

- ・人工光合成を目指して設計された実際の金属錯体光触媒を計測。放射光X線を用いて、レーザー光照射後に活性化状態にある光触媒の分子構造、電子状態を従来より高精度に測定することに成功。

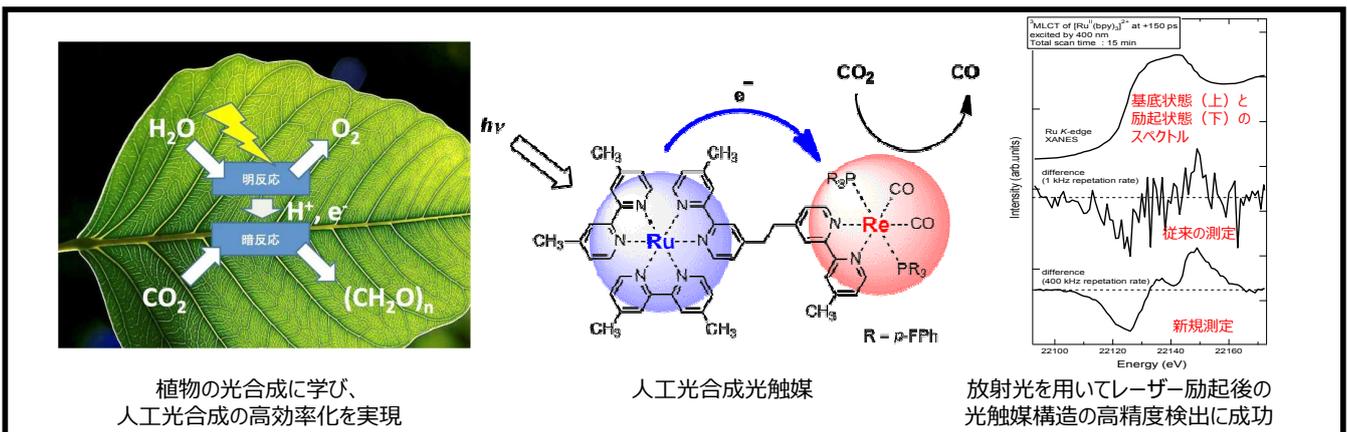
課題の中の位置づけ

- ・人工光合成光触媒の高効率化に向けた第1歩。本成果を元にPDCAサイクルを回して、より良い光触媒の開発へ。

本成果の展開、波及効果など

- ・本成果により、人工光合成の実用化に向けた基盤研究・開発が進展。近未来の水素社会に向けて、ソーラー水素発生・二酸化炭素固定化につながる基盤技術開発に期待。

(代表機関)	
KEK	足立 伸一
(参画機関: 4 機関)	
大阪大学	木村 真一
東京工業大学 (理)	石谷 治
東京工業大学 (工)	大友 明
首都大学東京	井上 晴夫



## 中間評価票

<b>1. 課題名 「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」</b>
<b>2. 総合評価：A</b> ・全体的に施設及び試料の整備・準備が整ってきて、研究成果が順調に出てきつつある。研究計画は着実に実施されており、課題内のグループ間の意思疎通も良好である。このまま研究を遂行すれば良い。光反応の中間ダイナミクスを捉える手法として確立することにより、人工光合成の研究をはじめとする多くの分野に有力なツールを提供することが期待される。 ・レーザー光ポンプ・放射光プローブ測定を可能として、今後の人工光合成光触媒開発に飛躍的な発達をもたらす研究開発を進めており、これまで極めて順調な進捗状況を示している。新しい光触媒の合成が成功し、そのレーザー励起過程の解析が開始されたことを高く評価する。課題間や課題内の連携も強力に進んでおり相乗効果が出るであろう。将来において、これらの研究が地球規模でのエネルギー問題解決に大きく貢献できるものと期待する。
<b>3. 観点別評価</b> <b>(1) 課題の進捗について</b> ・高エネルギー加速器研究機構（KEK）では高繰り返しファイバーレーザーの導入などにより測定時間の飛躍的短縮化を達成している。また KEK のコンパクト ERL（エネルギー回収型加速器）及び分子科学研究所の極端紫外光研究施設（UVSOR）でのコヒーレントテラヘルツ計測システムの整備も進んでいる。レニウム錯体などでの測定も進んでいる。事業が意図したレーザーと放射光の融合利用により人工光合成の短寿命反応中間体を直接観測できるようになった意義は大きい。発表論文数は 30 件で飛躍的に増えつつある。ただし社会への発信は十分とは言えない。 ・KEK のフォトンファクトリー-アドバンスリング（PF-AR）に導入した高繰り返しファイバーレーザーは、100 ピコ秒時間分解能、392kHz の繰り返しでの計測を可能とし、レーザー光ポンプ・放射光プローブ測定が可能となったことは、今後の人工光合成光触媒開発に飛躍的な研究効率をもたらすものであり、極めて順調な進捗状況を示している。また、PF および PF-AR ビームラインを用いて光反応ダイナミクスにおける過度的物質構造変化を追う予備的な測定を試みることが出来たことも進歩である。課題内の石谷グループ、井上グループにおけるルテニウム錯体、レニウム錯体光触媒の合成が成功し、そのレーザー励起過程の解析が開始されたことを高く評価する。

## (2) 研究体制について

・光触媒開発を行う再委託グループはそれぞれ精力的に研究を進めており、代表機関におけるレーザー・放射光の融合利用による時間分解軟 X 線計測システムの完成に伴って、それを駆使して光触媒の研究に画期的な進展がもたらされることが期待できる。

・これまでのところ全体会議は年 1 回程度であるが、今後はもう少し頻度を上げることも有益であろう。

・光量子の他の課題との合同研究会の開催などを通じて情報共有に努めている。

KEK 中心の体制であるが、徐々に他のグループとの連携が深まりつつある。他の研究課題との連携に関しては平成 27 年 10 月に辛課題「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」との共同の研究会を開催するなど努力している。

・KEK および大学関係のグループで組織されていることもあり、学会活動や論文発表が主で、社会や企業等への展開は十分ではないが、企業オブザーバーを置くなど情報共有はなされている。

・物質開発グループと施設グループの研究連携や情報共有が良くなされている。年 1 回の全体会議での議論も活発である。課題内の石谷グループ、井上グループの触媒合成グループの積極的な実験参加希望が出されており、非常に良い協力体制となってきた。辛課題との合同研究会を開催し研究連携を模索しており相乗効果が期待できる。

## (3) 今後の展望について

・この事業で開発された技術が試料の解析に利用され始められており、今後の成果が期待できる。反応機構の解析だけでなく、それを通じてさらに新たな高変換効率の素材開発が進むことに期待したい。

・PF-AR において稼働したレーザー光ポンプ・放射光プローブ測定装置によって測定効率が 400 倍になっており、今後の人工光合成光触媒開発が飛躍的に進むと期待される。これにより種々の触媒による光触媒活性の研究が進み、光エネルギーの化学エネルギーへの変換を促進させる要因が解明されると期待できる。これは地球規模でのエネルギー問題解決に大きく貢献できるものと期待する。

## (4) その他

・将来的に KEK-PF のオペレーションがどのようになるか不透明である。

⑤. 瀬戸課題

「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」  
の概要

1. 課題実施機関・体制

研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 瀬戸 秀紀

代表機関 高エネルギー加速器研究機構

参画機関 京都大学、同志社大学、九州大学、東北大学

2. 課題の概要・目的

○工業製品における摩擦によるエネルギー損失は GDP の 3%とも言われるように、エネルギーの効率的利用のためには摩擦と潤滑を制御することが重要な課題である。そのためには摩擦及び潤滑機構を理解することが必要だが、どちらのプロセスも物質の界面や界面間の狭い空間に挟まれた流体で起きており、現状では観察自体が難しく、また摩擦と潤滑の本質的な理解につながる分子スケールから原子スケールに至る階層的な構造とその動的振る舞いについては未知の部分が多い。本研究においては、大強度陽子加速器施設 J-PARC が生成する高強度の中性子とミュオンビームを活用することで、エネルギーの効率的利用に直結する摩擦及び潤滑機構の分子スケールから電子スケールに至る階層的な構造とその動的性質を明らかにするための測定技術を開発する事を目的とする。

3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	75,000	68,800	73,000		

⑤.瀬戸課題「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」【開始時】

課題内容

・中性子とミュオンの協奏的利用による摩擦と潤滑の基礎原理（トライボロジー）の解明。

目標

・中性子準弾性散乱とミュオンスピン回転法による「深さ分解ダイナミクス測定」の実現。  
 ・摩擦面と潤滑面における分子の運動状態の解明。

(代表機関)	
KEK	瀬戸 秀紀
(参画機関: 4 機関)	
京都大学	日野 正裕
東北大学	栗原 和枝
同志社大学	平山 朋子
九州大学	田中 敬二

期待できる研究成果

・タイヤの接触面と内部の運動状態の違いの解明。  
 ・摩擦・潤滑条件下による分子運動の分布の解析。  
 ・低潤滑界面の設計・製作と評価。



・低燃費タイヤの開発  
 ・高性能潤滑剤開発  
 ・生体模倣材料開発

深さ分解ダイナミクス測定

荷重

せん断

生体模倣材料

関節軟骨

タイヤ内部の分子運動

潤滑条件下での分子運動

低潤滑界面開発

⑤.瀬戸課題「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」【評価時】

成果「摩擦」と「潤滑」の理解のための、その場観察装置・手法を開発

・反射率及び共鳴スピンエコー実験用の中性子集光ミラーを開発し、集光に成功。  
 ・ミュオンスピン緩和法による磁気マーカーの信号観測に成功。  
 ・中性子反射率及び赤外分光により、油性剤吸着層の形成プロセスを解明。  
 ・ポリビニルエーテル水膨潤膜が摩擦の法則を逸脱する低摩擦を示す事を発見。  
 ・精密対向表面調製装置の開発により大面積でのnmギャップの調製に成功。

(代表機関)	
KEK	瀬戸 秀紀
(参画機関: 4 機関)	
京都大学	日野 正裕
東北大学	栗原 和枝
同志社大学	平山 朋子
九州大学	田中 敬二

課題の中の位置づけ

・基礎研究及び装置開発が計画通り着実に進み成果が出ている。  
 ・今後各機関・プロジェクト間、及び実験手法間の協奏的研究開発を一層進めることにより、相乗効果的成果創出による「摩擦」と「潤滑」のさらなる解明を推進する。

本成果の展開、波及効果など

・「摩擦」や「潤滑」を微視的に理解するための量子ビーム実験を、産業での利用実体に即した「その場観察」で実施する事が可能となる。それにより、トライボロジーの学理追求と産業の発展に大いに資すると期待される。

集光ミラーによる中性子ビーム集光

FWHM: 0.34 mm

サイズ0.34mm 反射率測定でゲイン3倍を達成

ミュオンによる磁気マーカー信号の観測

磁気マーカー導入後の信号

磁気マーカーの信号観測に成功

時分割中性子反射率測定による油性剤吸着プロセス観測

添加剤混入直後に濃縮層の形成が見られ、その後変化せず

PAO+D-Palmitic acid(6h)

油性剤が一旦物理吸着した後化学吸着に移行する事を発見

ポリビニルエーテル水膨潤膜に対する摩擦力の垂直荷重依存性

水膨潤により低摩擦化

水で膨潤させることにより摩擦の法則を逸脱する低摩擦界面を発見

大面積・精密対向表面調製装置の開発

大面積の対向表面においてnmギャップ調整が可能となり、中性子実験への適用が可能となった

## 中間評価票

### 1. 課題名 「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」

### 2. 総合評価：A

- ・J-PARC 中性子ターゲットの不具合のため中性子実験に遅れが出ているが、回転楕円体ミラーなどそれぞれの装置の準備等は進んでいる。中性子による実験より赤外線による実験に成果を見いだしている部分もあるが、互いの妥当性の確認など中性子と光ビームの連携にもなっている。
- ・量子ビームを用いて潤滑に関する知見を得ようとする新しい試みについて、各研究グループでの試行的な研究が続けられている。その中で、潤滑界面における添加剤吸着層において物理吸着の後で化学吸着が起こるという2ステッププロセスを持つことが中性子反射率測定によって明らかになったことは、注目すべき研究成果である。中性子スピネコー装置、中性子反射率計、ミュオン装置の開発・高度化等によって潤滑に関する解析手法が着実に進展することを期待する。
- ・中性子実験時間の制約はあったものの、研究成果は挙がってきている。大型の回転楕円体ミラーの開発などでいくつかのグループの共同作業が功を奏している。発表論文数は23件あり、中性子科学会、繊維学会、高分子学会などの賞も得ている。国際会議などの他、一般向けの講演会も開催している。
- ・摩擦や潤滑に関連する材料およびその界面の特性を、中性子やミュオンを用いて調べる実験手法の開発は概ね順調に進行していると評価できるが、摩擦現象における本質を捉えるにはマイクロからマクロまでの各階層の過程を関連させるために更なる工夫が必要と思われる。

### 3. 観点別評価

#### (1) 課題の進捗について

- ・中性子スピネコー装置および中性子反射率計の開発・製作は概ね順調に進行している。新型中性子検出器は製作に向けた最終調整段階に入っている。中性子集光用ミラー（1次元楕円及び回転楕円）の開発も進行している。
- ・磁気マーカーミュオンスピン緩和法の開発の一環として、ゴム材料であるポリブタジエンの $\mu$ SR（ミュオンスピン回転）測定を行い磁気マーカーの有無による信号の変化を捉えるなど、有望な結果を得ている。（カナダの加速器施設TRIUMFにおける成果）
- ・ヘキサデカン溶媒にブロック共重合分子を添加した潤滑剤の評価を行い、添加による摩擦低減効果と中性子反射率の変化の相関を見出した。
- ・J-PARC 中性子ターゲットの不具合が何度も長期に及んだこともあり、中性子スピネコー装置開発、中性子反射率計高度化は若干遅くなっているが、着実に進展している。ゴムの物性研究に $\mu$ SRが有効であることが確認できたことは、今後の研究につながると期待される。金属表面などにおける油性剤や潤滑油の吸着現象の研究では摩擦の有無に対する油性剤構造の違いなど明らかになりつつある。潤滑界面における添加剤吸着層において物理吸着の後で化学吸着が起こるという2ステッププロセスを持つことが中性子反射率測定によって明らかになったことは、注目すべき研究成果であると考えられる。いろいろな研究について今後の論文発表が増えることを期待したい。

## (2) 研究体制について

- ・全体会議の他、テーマごとの情報交換や、技術協力を行っており、マネジメントは適切である。回転楕円体ミラー開発では京大、KEK、理研など他課題との連携も含め共同開発を行っている。KEKにおいて若手の採用ができた。
- ・全体会議や研究会の開催によってグループ間の研究連携や情報共有が適切に行われている。また、高原課題「量子ビーム連携によるソフトマテリアルのグリーンイノベーション」や大竹課題「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」との連携が進んでおり、相乗効果も出てきている。理論グループとの連携を真剣に進めていただきたい。
- ・再委託先の各グループにおいてもそれぞれ研究が進行しているが、今後はそれらを総合して摩擦現象の本質に迫る更なる努力が求められる。

## (3) 今後の展望について

- ・J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の運転再開に伴って、集光型共鳴中性子スピネコ装置の開発、中性子反射率計の高度化、ミュオンへの磁気マーカー導入等によって潤滑に関する解析方法が着実に進展することを期待する。各研究グループの試行的研究を本格化させる際にメリハリのついた取捨選択、プロジェクト全体としての方向性の決定が必要になると考える。
- ・タイヤに関する研究は、産業界の関心という観点から光・量子融合連携研究開発プログラムの看板ともなり得るテーマであり、他グループとの連携も含めて研究成果を期待する。

## (4) その他

- ・特になし

## ⑥. 町田課題

### 「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」 の概要

#### 1. 課題実施機関・体制

研究代表者 日本原子力研究開発機構（JAEA） 町田 晃彦  
代表機関 日本原子力研究開発機構  
参画機関 高エネルギー加速器研究機構（KEK）、産業技術総合研究所（産総研）

#### 2. 課題の概要・目的

○水素貯蔵合金を利用したエネルギー貯蔵システムの実現を加速し、グリーンイノベーションへ貢献するために、水素貯蔵合金の実用化に向けた課題である水素吸蔵放出サイクルの繰り返し耐久性の向上のための材料開発指針を得ることを目的とする。そのために放射光 X 線および中性子を融合的に活用し、水素吸蔵放出反応過程をその場観察する計測技術の開発・高度化を実施する。そして水素吸蔵放出に伴うミクロ構造の変化に着目した材料劣化の因子を抽出し、劣化メカニズムの解明に取り組む。その結果を高耐久性合金の開発指針として提示する。また、将来的な普及の拡大を見据えた次世代材料の探索と放射光および中性子を利用した構造評価を実施し、新規材料開発の方針に関する指針を提示する。

#### 3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

#### 4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	45,000	41,400	42,500		

⑥.町田課題「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」【開始時】

課題内容

・水素貯蔵合金の実用に向けた課題を解決するため、放射光X線及び中性子を融合的に用いて、ミクロ構造変化に着目した水素吸蔵放出に伴う劣化メカニズムや、その場観察法を駆使した反応プロセスの解明を目的とした研究を行う。

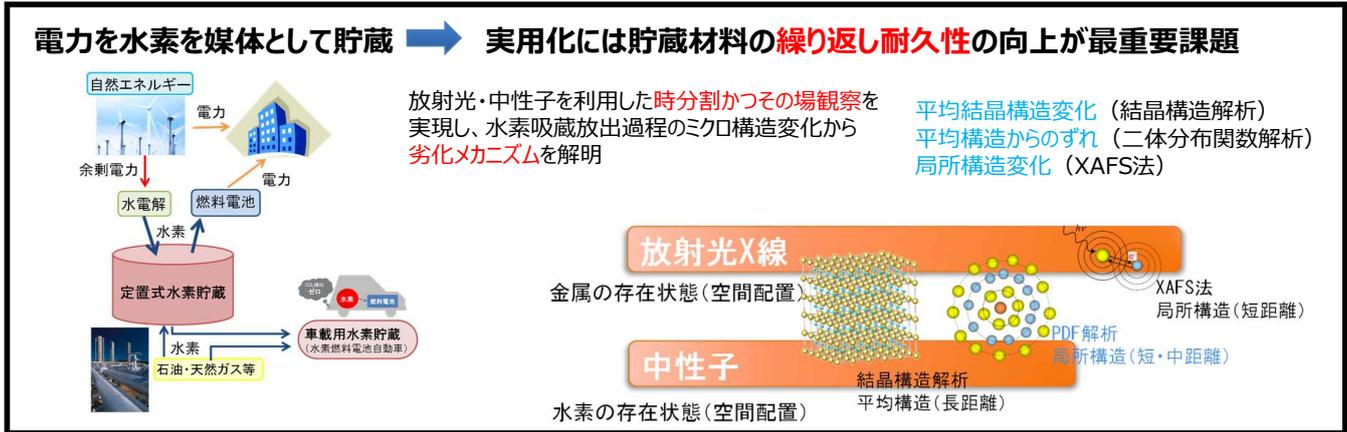
目標

・放射光X線及び中性子を利用した水素貯蔵放出過程の「時分割かつその場観察」を実現。  
 ・水素貯蔵合金の繰り返し耐久性に関わる課題を解決するための指針を提示。

期待できる研究成果

・ミクロ構造の変化という視点から水素貯蔵合金の劣化メカニズムの解明。  
 ・高耐久性材料の開発指針の提示による実用的水素貯蔵合金開発の加速。

(代表機関)	
JAEA	町田 晃彦
(参画機関: 2 機関)	
KEK	大友 季哉
産総研	中村 優美子



⑥.町田課題「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」【評価時】

成果  $V_{10}Ti_{35}Cr_{55}$ 合金の水素吸蔵過程におけるその場時分割X線全散乱測定に成功

・SPring-8 BL22XUに構築した時分割測定システムを利用して、この合金系では世界初となる時分割放射光X線散乱測定に成功。  
 ・解析可能なクオリティーでのPDF (二体分布関数) データを取得。

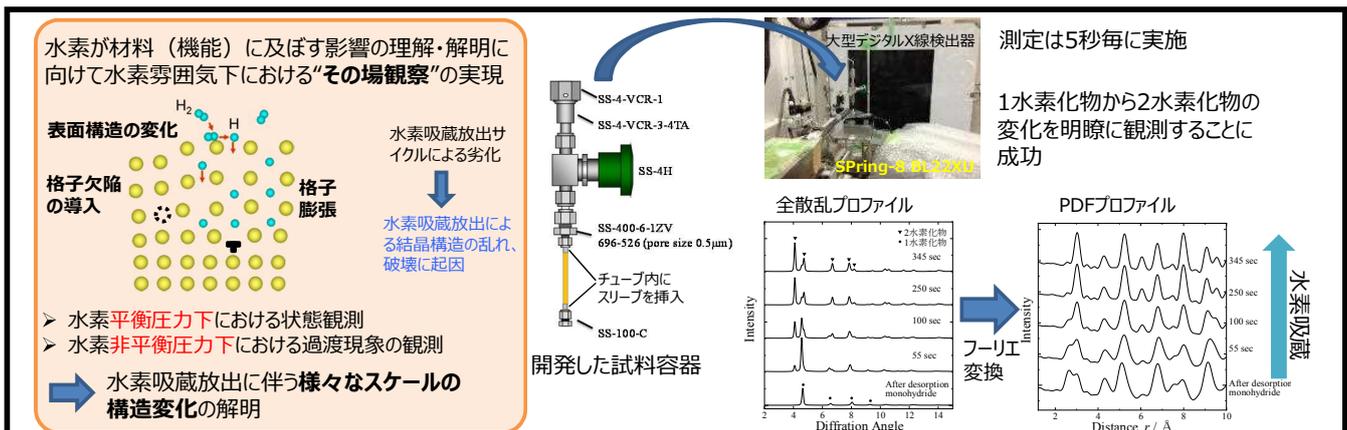
課題の中の位置づけ

・水素吸蔵放出過程をその場観察する計測技術の開発・高度化は本課題の第一目標。  
 ・その場観察実験用の試料容器の開発が測定成功のカギ。

本成果の展開、波及効果など

・水素吸蔵放出過程の構造変化をリアルタイムで観測 → 水素による格子欠陥等の導入メカニズムの解明  
 ・さまざまな分野で実施されている動作中の諸現象の計測 (オペランド計測) の実現

(代表機関)	
JAEA	町田 晃彦
(参画機関: 2 機関)	
KEK	大友 季哉
産総研	Hyunjeong Kim



## 中間評価票

<b>1. 課題名 「エネルギー貯蔵システム実用化に向けた水素貯蔵材料の量子ビーム融合研究」</b>
<b>2. 総合評価：B</b>
<p>・当初、研究進捗の遅れが懸念されたが、その場観察用試料容器の継手部分のシールに関する問題点解決が図られ、水素雰囲気中でのその場観察が可能となった。</p> <p>・概ね順調に進捗していると思われるが、本格的な実験には組成等の異なる多種の試料について系統的なデータ取得の必要があることから、データ取得および解析の更なる高度化・迅速化に向けた研究の加速を望む。</p> <p>・SPring-8 での実験は優れた成果が挙がっているが、J-PARC での実験は準備が遅れている。研究組織面では人事異動があったが影響は少ない。若手の採用は予定通りには進んでいない。</p> <p>・実験装置の高度化により、水素吸蔵材料の放射光 PDF（二体分布関数）データを 0.25 秒毎の時分割測定として取得可能になった事、V 系合金の劣化が PDF 解析の <math>Q_{\text{broad}}</math> パラメーターなどと相関を持つことを明らかにした。また、<math>V_{10}Ti_{35}Cr_{55}</math> の水素吸蔵過程のその場プロファイル取得や <math>AlNi_3</math> 合金水素化物の常圧安定性の証明に世界で初めて成功するなどの成果を挙げている。初期段階で現れた両ビームにおける試料容器の諸問題を解決して、研究が一気に本格化した。</p> <p>・今年度後半以降は水素吸蔵放出過程の観測の進展が期待される。</p>
<b>3. 観点別評価</b>
<b>(1) 課題の進捗について</b>
<p>・当初、水素雰囲気中測定のための試料容器の開発に予定よりも時間がかかったが、容器の継手部分のシールの方式を改良することにより、かなりの程度解決された。水素雰囲気中における水素吸蔵合金の X 線全散乱測定とその場観察およびその時間変化の追跡が可能となり、0.25 秒の露光時間で測定した X 線全散乱プロファイルから PDF データを得ることに成功するなど、進展が見られる。</p> <p>・Mg 系合金薄膜の局所構造解析に向けた X 線全散乱測定手法の構築を進め PDF 解析の結果、試料内部に 30 Å 程度の Ti クラスタが存在し、それが水素化に伴って面心立方格子構造の <math>TiH_2</math> に相変態したことを示唆するデータを得るなど、今後の展開に繋がる結果が得られている。</p> <p>・SPring-8 における時分割 X 線散乱による <math>V_{10}Ti_{35}Cr_{55}</math> 合金のその場観察に世界で始めて成功している。一方、中性子実験に関しては圧力に耐える容器の開発で試行錯誤が続いていたが、ようやく目処が立ちつつある。発表論文数は 6 件でやや少ない。外部への発信の段階に至っていない。</p> <p>・SPring-8 の専用ビームラインで 0.25 秒毎にその場実時間分割放射光 PDF データを取得できるようになった事は水素吸蔵材料の水素吸蔵放出過程を観測する上で大きな進歩である。この技術により、<math>V_{10}Ti_{35}Cr_{55}</math> の水素吸蔵過程のプロファイル取得を世界で初めて得た。また、この合金の水素吸蔵劣化は PDF 解析の <math>Q_{\text{broad}}</math> パラメーターや、格子欠陥、局所ひずみと相関を持つことを明らかにした。これらの成果を評価する。中性子ビームラインでも結晶配向性の強い Mg 薄膜合金の全散乱測定の実現に目途をつけることができた。初期段階で現れた両ビームにおける試料セルの諸問題を解決して、研究が一気に本格化したことは良い。新規の吸蔵材料の探索でも、高温高压合成によってえられた <math>AlNi_3</math> 合金の水素化物が常圧でも安定であることを世界で初めて明らかにした。これまでの論文発表等が少ないので、今後の成果取得に対して論文発表に力を入れてほしい。</p>

## (2) 研究体制について

- ・年2回を目途に課題の全体会議を実施し、進捗状況や実施上の問題などの報告を行い全体での情報の共有を図っているが、今後はもう少し頻度を上げて連絡をさらに密にすることも有益であろう。情報発信の観点から、ホームページ等を通じた活動状況や研究成果の発信に努めてほしい。
- ・年2回の全体会議の他、適宜テーマごとのミーティングを行っている。マネジメントに関しては、これまでは各研究者の進め方に委ねていたが、今後はリーダーシップを発揮しようとしている。他の課題、他のプログラム等との連携は少ないが、本課題の推進のために企業や大学等から研究協力者を補強している。採用を期待した研究員の採用ができず補助員の採用となっている。
- ・日本における当該研究分野では最良の放射光装置担当者、中性子装置担当者、試料作り担当者がこの研究プロジェクトに参加しており、年2回の全体会議や随時の会議で相互の連携や情報共有もしっかりとれている。新たに、第一原理計算による構造予測や格子欠陥分野の理論家にも参加してもらっている点も良い。学振第190委員会での成果発信等も行っている。

## (3) 今後の展望について

- ・平成27年秋以降の具体的計画として多くの実施事項が列挙されているが、優先順位を明確にして、残りの期間において最大の成果を挙げるよう工夫が望まれる。
- ・社会的に期待が大きい課題であり、試行錯誤が続いているものの、少しずつ成果が出始めており、今後 J-PARC 中性子ターゲットの不具合で中断されている中性子実験が開始されれば発展が期待される。
- ・試料容器関連の初期トラブルを克服したので、J-PARC での中性子ビーム供給ができれば、放射光、中性子両ビームを使った水素吸蔵放出過程のその場構造解析や新規の吸蔵材料の探索等がさらに進展するものと期待される。

## (4) その他

- ・特になし

⑦. 辛課題

「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」  
の概要

1. 課題実施機関・体制

研究代表者 東京大学 辛 埴  
代表機関 東京大学  
参画機関 高輝度光科学研究センター（JASRI）

2. 課題の概要・目的

○軟X線は物質の電子状態を研究するのに最も重要な光であり、これまで放射光が広く用いられている。一方、近年のレーザー技術の革新により、極端紫外から軟X線にわたる短波長光の発生が実現し、放射光を補完する光源として期待されている。しかし、軟X線分光は光源技術に大きく依存しているため、光源の壁を越えた軟X線の利用研究は限られたものにとどまっている。

○本研究では、レーザー短波長光源を高度化し、物性応用に十分な性能を実現する。これは世界でも初めての試みである。また、放射光施設 SPring-8 の最先端ビームラインである BL07LSU と BL25SU において軟X線分光技術をさらに高度化する。最先端の軟X線光源であるレーザーと放射光が連携することによって、光電子分光、顕微分光、発光分光を主要な柱とする、軟X線計測プラットフォームを創成する。この研究開発により、光電子分光や発光分光などの超高分解能分光や、ピコ秒、フェムト秒からアト秒までの広い範囲の時間分解分光法の実現が期待できる。それにより、電子状態の超精密測定や、励起状態の動的過程を直接観測し、理解することが可能となり、グリーンイノベーションにつながる物質の開発に貢献する。これら一連の基盤研究開発は、軟X線領域の物性科学の創成を目指して、レーザーと放射光分野の第一線の研究者らの密接な連携によって実施する。

3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	167,000	153,600	178,000		



## 中間評価票

<p>1. 課題名 「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発」</p>
<p>2. 総合評価：S</p> <p>・レーザー高次高調波による軟 X 線の発生が予想以上の進展を遂げており、物性研究に利用されているなど、高く評価する。さらに、SPring-8におけるマイクロビーム軟 X 線発生と物性研究への利用でも大きく進展している。これらの今後の研究開発成果や軟 X 線一般供用に期待が持てる。課題内、課題間、企業との連携も良い。</p> <p>・十分な準備と研究機関の支援もあったため、順調に研究が進んでいる。目標が明確で体制、実現能力ともに目標に見合っているので、今後の展望も期待できる。</p> <p>・短波長レーザーの開発が予定通り進んでおり、紫外から軟 X 線領域の分光実験も精力的に進められている。軟 X 線領域の科学の新局面を拓く可能性を感じさせる研究進展である。</p>
<p>3. 観点別評価</p> <p>(1) 課題の進捗について</p> <p>・繰り返し 1kHz の高強度超短パルス Ti サファイアレーザーの開発で 10mJ/パルスを達成した。高次高調波発生の手法で 330eV に到達するコヒーレント軟 X 線の発生、および、炭素系物質の K 吸収端における微細吸収構造の観測を達成した。</p> <p>・100MHz 繰り返し 6eV レーザーや 1MHz 繰り返し高次高調波システム用の Yb ファイバーレーザーシステムの開発が順調に進み、目標以上のパワーを実現している。</p> <p>・分光実験ステーションの整備も進み、時間分解光電子分光測定によって、VO<sub>2</sub>における光誘起金属-絶縁体転移、電子ドープしたトポロジカル絶縁体におけるフォノン温度の決定、価数揺動系物質 Yb 化合物における価数揺動の直接観測、グラフェン中のディラック電子によるキャリアマルチプリケーションの直接観測、銅酸化物および鉄系超伝導体における非平衡励起状態電子の緩和過程の直接観測等の物性研究が精力的に進められている。</p> <p>・最終目標の 600eV の高調波レーザーにはまだ達していないが、330eV のコヒーレント軟 X 線発生に成功した。真空紫外領域の高調波レーザーおよびビームライン実験装置の建設も順調に進んでいる。SPring-8 の軟 X 線ビームライン BL25SU の改造も完了し利用されている。論文発表数は 47 件と多い。プレス発表も多く外部発信も努力している。</p> <p>・レーザー高次高調波によって 330eV に達するコヒーレント軟 X 線の発生と、炭素系物質の K 吸収端における微細吸収構造の観測に成功した。また、82eV までの高調波レーザービームラインを利用に供し、価数揺動系物質、グラフェン、高温超電導体などの物性研究に利用されているなど、予想以上の進展を遂げており、高く評価する。さらに、SPring-8 におけるマイクロビーム軟 X 線発生と物性研究への利用でも大きく進展しており、今後の成果に期待が持てる。</p>

## (2) 研究体制について

- ・レーザー開発グループ、分光測定グループ、放射光グループがそれぞれ役割をきっちり果たして成果を挙げている。
- ・コンパクトな研究組織であることもあり、情報共有のための会合等はよく行われている。足立課題「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」との共同シンポジウムの開催の他、文科省の他のプログラムや企業との連携研究も行っている。
- ・セミナーや月一度のミーティングなどによって、グループ内の研究連携や情報共有は達成されている。企業への技術協力や技術移転が計画以上に進んでおり、社会への還元が大きい。足立課題との研究連携も本格化しており、相乗効果が期待できる。

## (3) 今後の展望について

- ・高調波レーザーの光子エネルギーの上限に関しては、目標はまだ達成できていないものの、高調波レーザーが軟X線源として実用的なものになることを示すという意味では、今後さらに成果が出るのが期待できる状況にある。高調波レーザーの利用はかねてアイデアはあったものの、ビーム強度が弱くて実用にならないとされていたが、本課題における開発によって、SPring-8の軟X線ビームラインとともに、軟X線領域の物性科学の進展に貢献することが期待できる。
- ・レーザーと放射光の連携によって更に軟X線分光技術を発展させて、その計測プラットフォームを形成し、一般利用に供されると強く期待できる。
- ・真空紫外・軟X線領域の分光実験を革新する可能性を秘めた課題であり、今後の進展が大いに期待できる。

## (4) その他

- ・特になし

(2)「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」課題-2

⑧. 照沼(浦川)課題

「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」  
の概要

1. 課題実施機関・体制

研究代表者 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 浦川 順治 (H25～H26.10)  
高エネルギー加速器研究機構 照沼 信浩 (H26.11～現在)  
代表機関 高エネルギー加速器研究機構  
参画機関 広島大学、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、株式会社リガク、日本大学、  
早稲田大学、東北大学、産業技術総合研究所 (産総研)、京都大学

2. 課題の概要・目的

○ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断・治療への利用を画期的に飛躍させる数 keV から 100keV の X 線領域の小型高輝度 X 線発生装置の基盤技術開発を行う。

(目標性能) Peak Brightness :  $10^{19}$  (photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)  
装置フットプリント : 6m × 8m  
消費電力 : 100kW

逆コンプトン散乱 (ICS) による X 線生成により、レーザーパルスと電子ビームの衝突を高繰返しミクロンサイズ精度で行うことによって高輝度 X 線生成を実現させる。再利用のコンセプトによりレーザーパルス蓄積 1MW と電子ビームパワー 1MW の安定高繰返し衝突を 100kW 程度の電力で実現する。

○ICS X 線の特徴である準単色コーンビームの画期的な利用展開に繋がる小型高輝度 X 線源に必要な基盤技術開発を行い、実用化を図る。本研究にて実施する技術開発項目はマルチアルカリカソード、クライオ光陰極高周波電子銃、エネルギー回収型超伝導高周波加速器、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御、レーザー光路精密調整及び X 線イメージング法である。

3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度 (予定)

4. 予算 (執行額) の変遷

年度	H25 (初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額 (千円)	250,000	230,000	230,000		

⑧.照沼(浦川)課題「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」【開始時】

課題内容

・ナノ構造解析、創薬、医療診断・治療への利用を画期的に飛躍させる  
数keVから100keVのX線領域の小型高輝度X線発生装置の基盤技術  
開発を行う。

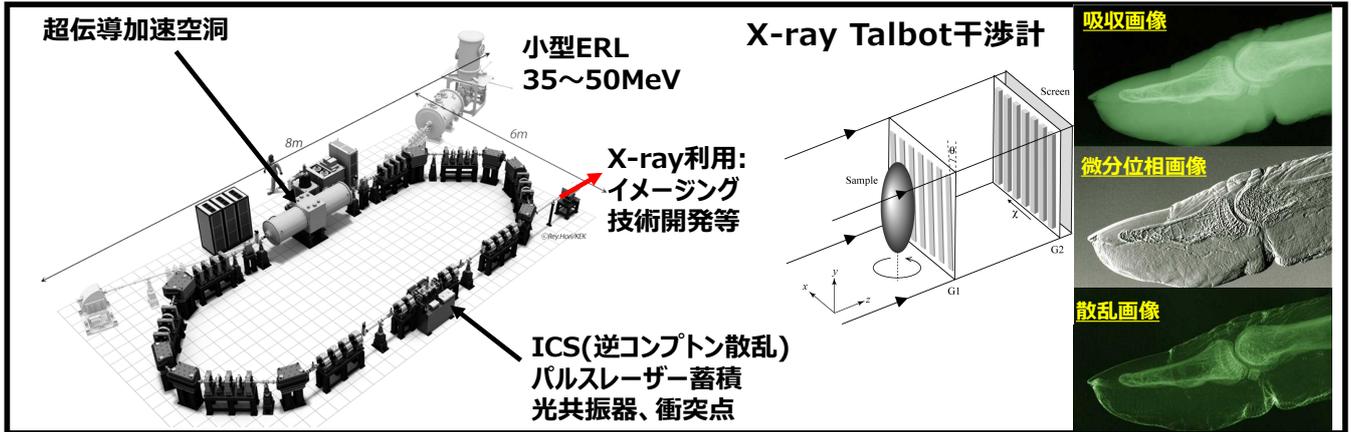
目標

・超伝導加速器技術を使ったエネルギー回収型線形加速器とレーザー  
パルス蓄積衝突技術を融合することでPeak Brightness  
 $10^{19}$ (photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)を実現する。  
・装置サイズ：6mx8m、消費電力：100kW程度を想定。

期待できる研究成果

・大電流電子ビーム生成・加速技術。MW級レーザーパルス蓄積。  
・小型高輝度光子ビーム源及び先端X線イメージング利用。

(代表機関)	
KEK	浦川 順治
(参画機関： 8 機関)	
広島大学	栗木 雅夫
JAEA	羽島 良一
株式会社リガク	虎谷 秀穂
日本大学	田中 俊成
早稲田大学	鷲尾 方一
東北大学	百生 敦
産総研	黒田 隆之助
京都大学	岩下 芳久



⑧.照沼(浦川)課題「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」【評価時】

成果 高繰り返し逆コンプトン散乱X線生成に成功

・エネルギー回収型試験線型加速器とレーザー蓄積光共振器により、レーザー  
逆コンプトン散乱(LCS)による準単色・微小光源X線を、162.5MHzの  
高繰り返しで生成することに成功し、X線イメージング試験を開始した。  
・LCSによるX線としては国内最大の毎秒 $4 \times 10^7$ の光子数生成を達成。

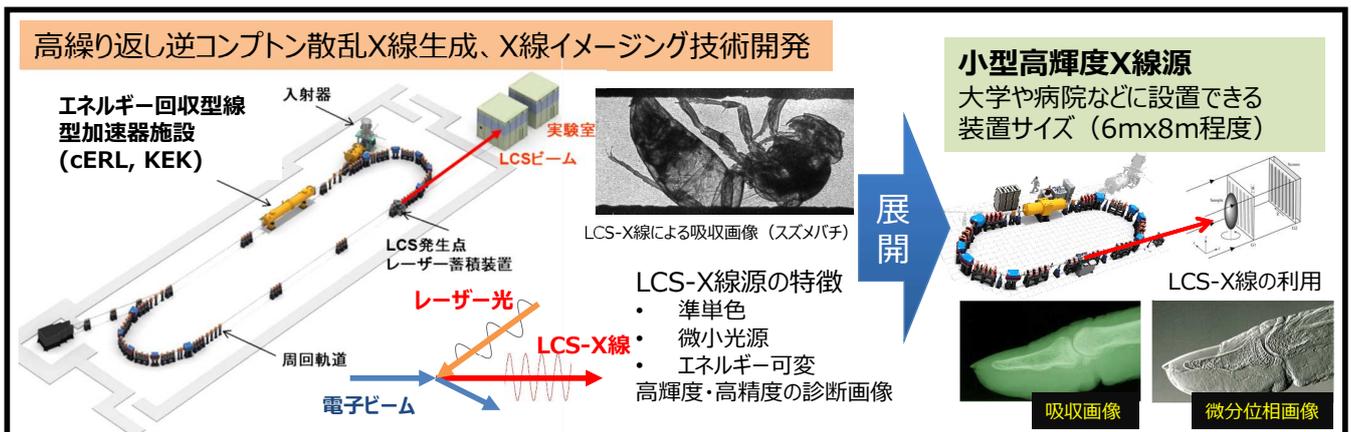
課題の中の位置づけ

・数keVから100keVのX線領域の小型高輝度X線発生装置に必要な  
基盤技術開発を組み合わせた総合実証試験。準単色・微小光源X線  
による先端的イメージング技術開発を行うための重要なマイルストーン。

本成果の展開、波及効果など

・大型放射光施設に匹敵する高輝度X線を、大学や病院など身近な場所に  
導入可能な小型高輝度X線発生装置で実現。  
・準単色・微小光源X線の利用が画期的に普及し、生命科学研究、  
ナノ構造解析、創薬、医療診断・治療が大きく進展する。

(代表機関)	
KEK	照沼 信浩
(参画機関： 8 機関)	
広島大学	栗木 雅夫
JAEA	羽島 良一
株式会社リガク	栗林 勝
日本大学	田中 俊成
早稲田大学	鷲尾 方一
東北大学	百生 敦
産総研	黒田 隆之助
京都大学	岩下 芳久



## 中間評価票

<p>1. 課題名 「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」</p>
<p>2. 総合評価：C</p> <p>・小型常伝導線形電子加速器（LUCX）にレーザー蓄積共振器を組み込んで、逆コンプトン散乱を起こすことにより、X 線光子数 <math>10^8</math> photons/sec を達成したこと、エネルギー回収型加速器（cERL）を用いた X 線イメージングのファーストデータとしてスズメバチの透過画像取得に成功したことは、研究進展を表すものとして評価するが、cERL の運転計画等の問題により、本課題が当初目標として掲げた X 線光子数を研究期間内に達成することは困難な状況となっている。このような状況がある中、事業目標である装置の高度化・小型化の実現、およびイノベーション創出に向けた研究基盤の形成に向けた方策や技術的課題を総合的に把握しきれておらず、課題全体としての目標達成・集約に関してほとんど議論されていない。</p> <p>・当初の目標が達成できない状況の下で、交替した代表研究者の努力は評価できる。基盤技術開発課題として目標性能を期間内に達成できないこと、他手法ではできない新たなイメージング技術の開発および実用化までの道のりが見通せないこと、課題内で事業完了への集約が見受けられないこと等から、課題の解体的見直しが必要である。</p> <p>・一方で、個別の技術開発項目(サブテーマ)においては、近々のアウトプットが期待されるテーマもあるため、これを散逸させない観点から、サブテーマの進捗状況把握と成果のとりまとめが望まれる。</p> <p>・総じて、制約のある環境の中で各々の要素技術開発に関しては最大限の努力がなされており、個別の成果としては優れたものがあると理解するが、各要素技術をまとめた成果とする委託事業としての達成度は不十分と判断せざるを得ない。</p>
<p>3. 観点別評価</p> <p>(1) 課題の進捗について</p> <p>・cERL ビームラインに 8 鏡レーザー蓄積共振器システムを組み込み、レーザーコンプトン散乱による X 線の発生 (<math>4 \times 10^7</math> photons/sec) とイメージングのファーストデータとしてスズメバチの透過画像の取得に成功したことは大きな進展である。</p> <p>・LUCX にレーザー蓄積共振器を組み込んで、逆コンプトン散乱を起こすことにより、X 線発生数 <math>10^8</math> photons/sec を達成した。また、1 MW レーザー強度を超えるための知見を得た。これらは、着実な研究進展を表すものとして評価はするが、既存の X 線イメージング技術よりも優位な点は見いだせない。</p> <p>・LUCX および cERL の電子ビーム強度は増強しつつあるとはいえ、十分とは言えない中で、レーザー蓄積共振器の蓄積率向上に伴い、X 線発生量が増加し、成果を発表できたことは評価できる。しかし現状では X 線管球よりも 1000 倍程度強度が低く、計画しているレベルの Talbot-Lau 干渉計による実験はできていない。</p> <p>・当初計画のうち、独自に開発した超伝導加速管を利用する高輝度 X 線源開発計画は、小型化を念頭において 4 K での動作を目指したスポーク空洞方式を採用する方針を採ることとしたため、本事業期間内に実機を製作するところまでは望めない。スポーク空洞に方針転換したことは小型化という目標を考慮すれば理解できなくはないが、超伝導課題全体の整合性には問題がある。</p> <p>・発表論文数は 20 件、特許出願数は 2 件である。最近の cERL による成果に関してはプレス発表も行っている。</p> <p>・目標として掲げていた Peak Brightness <math>10^{19}</math> (平均 Brightness <math>10^{16}</math>) は X 線フラックス <math>10^{13}</math> photons/sec</p>

に相当するが、現在のX線生成数は  $10^8$  photons/sec であり、事業期間内での達成は困難であることを課題代表者らも判断している。

### (2) 研究体制について

- ・全体会議を2か月に1回という頻度で開催し、各グループの進捗状況の情報交換に努めていることは評価できる。頻度が高い分、開催するのであれば、各グループからのルーチン的な報告のマンネリに陥らないよう、毎回ディスカッション・テーマを絞るなどの工夫は重要である。
- ・課題内の情報共有は十分であるが、それぞれの興味を優先させている面がまだ見られる。研究代表者は LUCX および cERL での実験に集中しようと努力しているようであるが、十分ではない。委託事業として期限内に完了させることについては、ほとんど議論されていない。
- ・外部への展開等に関してはそれぞれの担当者の興味ある分野へは進んでいるというが、むしろ散漫になっているが、この事業の目的に添ったものとはなっていない。人材育成面では大学などで若手の参加があり進んでいる。
- ・今後の開発計画における各グループの活動が、当課題の目標  $10^{13}$  photons/sec の達成にどのように繋がっていくのか読み取り難い。

### (3) 今後の展望について

- ・今後の cERL の運転 (1MW へのパワー増強) の見通しが明るくないことから、それに応じた見直しが必要である。
- ・超伝導加速空洞の開発は広い意味では意義が認められるが、本課題の見直しの中で、位置づけについてより明確にする必要がある。
- ・イメージング装置として使いものになることを示すまでは、cERL での実験などに集中して到達点を示すべきである。ある程度の成果が上がれば、本来の目的であった小型化した高輝度 X 線源装置実現の期待も高まるであろう。
- ・一方、散漫になっているとはいえ各研究者がその興味のある技術開発を行っているものの中には、個別に見れば注目すべきものもあるので、サブテーマを成果としてとりまとめることの意義はある。
- ・1MW 電子ビームを実現することが困難となったために、実用上必要とする  $10^{13}$  photons/sec の X 線発生数を得る当課題の目標達成は困難となっている。

### (4) その他

- ・特になし

## ⑨. 大竹課題

### 「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの 整備・高度化」の概要

#### 1. 課題実施機関・体制

研究代表者 理化学研究所 大竹 淑恵

代表機関 理化学研究所

参画機関 名古屋大学、北海道大学、東京都市大学、京都大学

#### 2. 課題の概要・目的

○本委託事業では、ものづくり現場で必要とされる「利用者がボタン一つで結果を見ることができ  
る可視化ソフトウェアを含む、高度かつ手元で使える小型高輝度中性子源統合システムの開発」を  
目的とする。これらの整備・高度化により、ものづくり現場において鉄鋼材料のナノ構造や  
バッテリー等の解析が J-PARC 等の大型施設と相補的に実施可能となり、自動車・航空機  
産業をはじめとした製造業で中性子を利用した製品開発が加速することで、我が国における  
新産業創出の起爆剤となることが期待される。

○目的を達成するため、以下の項目に取り組む。

- ・ 小型中性子源の整備  
（短パルスイオン発生源の開発）
- ・ 中性子発生源の高度化開発
- ・ 中性子線の集光による高輝度化開発
- ・ 光学素子の開発
- ・ 中性子検出器システム開発
- ・ 可視化（解析・評価）システム開発

○上記項目で開発した技術を収斂、システム化することで、高張力鋼板やマグネシウム合金等軽  
量化材料の適用拡大に資するため、それらの金属材料の変形挙動を計測、観察し、結晶レベル  
の微視的変形情報に関する観測結果が取得可能となる。これにより、従来の巨視的材料構成則  
に基づく塑性加工解析では不可能な、革新的高精度成形加工解析を実現するための基礎データ  
とし、将来の新材料・新工法の創出に寄与する。

#### 3. 実施期間

平成 25 年度～平成 29 年度（予定）

#### 4. 予算（執行額）の変遷

年度	H25(初年度)	H26	H27	H28	H29
執行額(千円)	83,000	76,360	88,000		

⑨.大竹課題「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」【開始時】

課題内容

- ・小型中性子源の整備、中性子線の短パルス化、中性子線の高輝度化、可視化ソフトウェアの開発を行い、利用者が簡単にボタン一つで結果を見ることができるシステムを構築する。

目標

- ・「利用者がボタン一つで結果を見ることができるような可視化ソフトウェアを含む高度な手で使える小型高輝度中性子源統合システム」の開発。

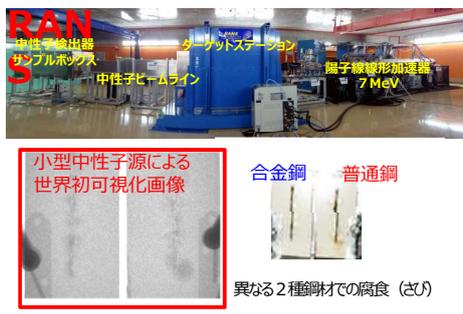
期待できる研究成果

- ・ものづくり現場で鉄鋼材料のナノ構造やバッテリー等の解析が可能に。
- ・自動車・航空機産業をはじめとした製造業で中性子を利用した製品開発が加速。
- ・我が国における将来の新材料・新工法の開発、ひいては新産業創出の起爆剤に。

(代表機関)	理化学研究所	大竹 淑恵
(参画機関: 4 機関)	名古屋大学	清水 裕彦
	北海道大学	古坂 道弘
	東京都市大学	持木 幸一
	京都大学	浜 孝之

**[鉄鋼材料系]**

- ◆ 塗膜下の腐食、水の出入り可視化成功



◆ 腐食対策費 4 兆円/年

ものづくり現場に小型中性子源があると腐食メカニズム解明 + 新素材開発 → 数兆円の経済効果

**[バッテリー非破壊検査]**

ハイブリッドカー 電気自動車。新技術



バッテリー発火事故 非破壊検査による事故防止

B787 バッテリー出火事故

⑨.大竹課題「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」【評価時】

成果 塗膜下鋼材内部腐食と水の動きの可視化成功

- ・塗膜を施した防食合金と普通鋼の腐食と腐食に関連した水の動きを「バルク」で観察し非破壊で得次元モデル形状創成が出来た。

薄板鋼板の変形前後での集合組織ならびに複相観察に成功

- ・中性子回折法により、自動車鋼板など強度と易成型を満足する鋼板開発に必須な変形前後の鉄鋼材料集合組織の観察、ならびに複相鋼板の異なる相の観察に成功した。さらに可視化ソフトシミュレーションとの連携へと発展することを示した。

課題の中の位置づけ

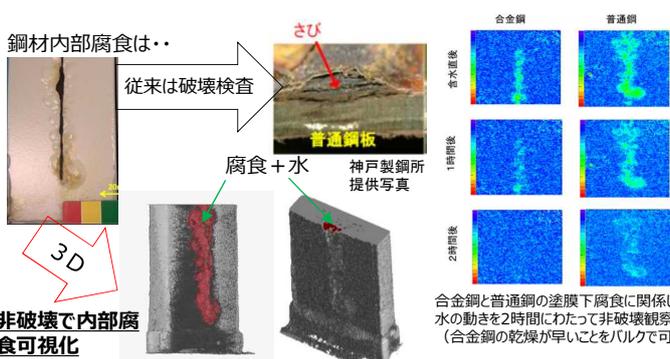
- ・小型中性子源が、ものづくり現場で鋼板開発、防食合金開発ならびにプレス鋼板材料加工等において、必要な情報を引き出せることを示唆した結果である。

本成果の展開、波及効果など

- ・小型中性子源によるイメージングおよび回折法が十分有効であることが示された。これにより、金属材料をバルクで現場評価を可能とする技術開発へと展開が見込まれ、将来長寿命鋼材、軽量化鋼材の実現、またバッテリー等の現場非破壊観察へと波及可能である。

(代表機関)	理化学研究所	大竹 淑恵
(参画機関: 4 機関)	名古屋大学	清水 裕彦
	北海道大学	古坂 道弘
	東京都市大学	持木 幸一
	京都大学	浜 孝之

■ 塗膜下鋼材内部腐食と水の動きの可視化成功



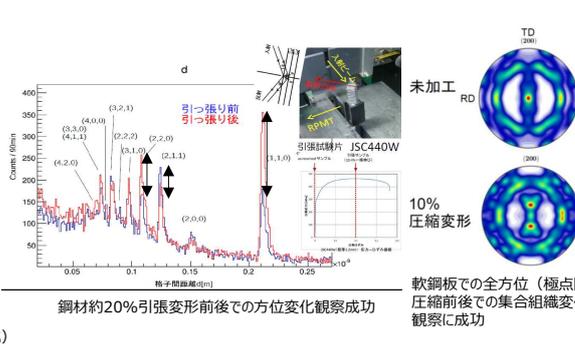
鋼材内部腐食は、従来は破壊検査

3D 非破壊で内部腐食可視化

腐食 + 水 神戸製鋼所提供写真

合金鋼と普通鋼の塗膜下腐食に係る水の動きを2時間にわたって非破壊観察 (合金鋼の乾燥が早いことをバルクで可視化)

■ 薄板鋼板の変形前後での集合組織ならびに複相観察の成功



鋼材約20%引張変形前後での方位変化観察成功

軟鋼板での全方位 (極点図) 圧縮前後での集合組織変化の観察に成功

## 中間評価票

<b>1. 課題名 「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」</b>
<b>2. 総合評価：A</b>
<p>・小型プロトン加速器の要素開発によって小型中性子源 RANS を稼働させ、鉄鋼材内部の3次元可視化や集合組織観察のための中性子回折ピーク解析などにおいて、初期的な成功を得た。これらは、当初の計画を超えた進捗スピードでの達成であり、高く評価する。産業界からの関心、期待も大きく、注目されている。小型中性子源要素開発への更なる進展によって、今後の中性子利用成果が大いに期待でき、世界をリードし続けることを望む。</p> <p>・これまでの研究進捗は順調と評価できる。小型中性子源によるイメージングのデモンストレーションは目標とする「ものづくり現場」での利用に向けて、ユーザーを開拓する上で大きな意義がある。RANS の専用実験ホールへの移設・立ち上げを経て、更なる飛躍を期待する。</p> <p>・研究機関側の支援があり、取組は十分で新しい専用の実験棟が建設された。装置の移設のため一時的に実験が中断されたが、今後の展開が期待される。</p>
<b>3. 観点別評価</b>
<b>(1) 課題の進捗について</b>
<p>・小型中性子源 RANS による、鉄鋼材料における内部腐食のイメージングや水の可視化、応力歪み曲線と中性子回折との相関の実証などは、潜在的ユーザーに対する有効なデモンストレーションである。中性子集光ミラーの開発に進展がある。</p> <p>・中性子ビームの短パルス化、中性子ビーム集光ミラーの製作と評価、金属ひずみ解析ソフト開発などのほか、腐食構造の3次元観察、金属材料変形時の中性子回折による観察など当初の期待を越える成果も得ている。論文発表数は20件、特許申請数は1件である。30以上のセミナーやシンポジウムにおいて発表し、一般の見学等も受け入れている。</p> <p>・小型プロトン加速器の要素開発を経て小型中性子源 RANS が稼働し始め、既に、塗膜下鋼材内部腐食と水挙動に関する3次元可視化の成功や中性子回折ピーク解析による鋼材集合組織の観察、などにおける初期的な成功を得た。小型中性子源に対する産業界からの関心、期待が大きい。これらは、所期計画を超えた進捗スピードでの達成であり、高く評価する。平成27年度はRANSの移転を進めており、進展は少ないが今後期待できる。これまでの論文発表等が少ないので、今後の成果取得に対して論文発表に力を入れて欲しい。</p>

## (2) 研究体制について

- ・全体会議は年1回程度であるが、IT 利用などで情報共有・連携を図っており、マネジメントは適切である。瀬戸課題「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」とは集光ミラーの製作などで交流を図っている。
- ・鉄鋼協会など産業界から有力なアドバイザーが参加して施設利用希望の高さを持続させる施設運営をしており、社会的なインパクトが大きい点も評価する。また、産業界に直結したセミナーやシンポジウムで多くの講演や RANS 施設での見学者を多く受け入れており、情報発信に努めている。
- ・大学関係の参画機関では若手も育成され関係学会からも評価されている。
- ・潜在的ユーザー開拓に向けて積極的な広報活動を行っている。

## (3) 今後の展望について

- ・冷中性子源の開発を目指すなど更なる展開を図っており、企業などからの期待も高い。ただし学術的には、今後、放射光によるよりマイクロな研究など鉄鋼業界の最先端の関心事との情報共有なども望ましい。一般的な普及に向けての展開だけでなく、成果を学術論文や特許として確実に残す努力をすることにより、さらに評価が高まるであろう。
- ・RANS 移転を契機に、小型中性子源要素開発を更に発展させて、鉄鋼材料をはじめとするいろいろな材料の研究成果創出が大いに期待できる。また、J-PARC 利用の篠原課題「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」とも連携して、社会・企業への成果還元や広範な分野での中性子ビーム利用機会の増大に寄与していただきたい。

## (4) その他

- ・普通の加速器や中性子の専門家はこの程度の小型装置で中性子回折までできるとは考えなかったかも知れないが、ユーザーのニーズに応えようと果敢に挑戦して希望を見いだせる状況を作り出している。