

**研究成果展開事業
研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）
産業ニーズ対応タイプ**

**技術テーマ「コンパクト中性子源とその産業応用に
向けた基盤技術の構築」**

追跡評価用資料

令和4年1月

目 次

1. 技術テーマの詳細	3
(1) 概要	3
(2) プログラムオフィサー (PO)	3
(3) アドバイザー	4
2. 追跡調査の概要	5
(1) 調査の目的	5
(2) 調査の対象	5
(3) 調査の方法	6
3. 追跡調査結果	7
(1) 研究開発の継続状況	7
(2) 研究開発資金等	10
(3) 研究開発成果 (科学技術や社会・経済への波及効果)	12
(4) 主な研究活動 (主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等)	13
(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等	18
4. 総合所見	19

1. 技術テーマの詳細

(1) 概要

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」（平成 27 年度発足、令和元年度終了）

日本では大型施設による放射光と中性子線の相補的利用により中性子線の特徴の理解が深められるにつれて、その産業利用への期待が大いに高まっています。中性子線の有する高い透過力や軽元素の識別能力などの特徴は、産業利用の分野でも分析・解析ツールとして広く活用されるべきです。しかし、実験室で利用可能な X 線発生源と比較して、中性子線の発生源は研究用原子炉や大型加速器であり、その利用機会は著しく制限されています。中性子線の産業利用の裾野が拡大し、我が国の高い技術力・競争力の維持に貢献するためには、高輝度でコンパクトな中性子線源の開発と、その利用技術の高度化が不可欠です。

そこで本技術テーマでは、中性子線の産業利用に適した小型高輝度中性子線源から構成される分析解析システムの開発を目指して、その主構成要素であるコンパクト中性子線の基盤技術の確立と実証研究を推進した。

一方、測定・解析・分析技術としての中性子を含めた量子ビームの産業応用に対しては、多様なニーズが存在しています。例えば、イメージング技術と回折技術を駆使する技法の産業応用には、構造物検査、集合組織解析、複合材料解析、残留応力解析、リチウム電池や燃料電池の部材開発・動作環境解析、高分子材料開発などがあり、また、分析技術の応用としても、食品成分分析、多成分組成分析などと、多様な応用が想定されています。

そこで本技術テーマでは、具体的な測定対象、利用分野などを想定した上で、中性子線の特徴を活かした検出・可視化・分析システムの開発・実証研究を推進しました。コンパクト中性子源からの中性子線の制御・検出技術を高度化し、具体的な利用の用途に応じた計測・分析システムを構成する個々の構成要素の開発へと連なる基盤技術の開発・実証研究を取り上げた。

また研究の推進にあたっては、この制度の特徴である産業界と研究者との対話の場「産学共創の場」を活用することにより、産業界のニーズを常に共有し、研究者の基礎基盤研究に反映していくことで、世界をリードする独創的な基盤技術の構築を目指した。

(2) プログラムオフィサー (PO)

吉澤英樹（一般財団法人放射線利用振興協会 東海事業所 理事、東京大学 名誉教授）

(3) アドバイザー

本技術テーマで委嘱したアドバイザーは表1に示す通りであり全7名である。アドバイザーの人選に当たっては、採択課題が多岐に渡ることから、それぞれのアドバイザーの専門性と経験を考慮した。学会からの人選においては、中性子発生から測定全般に学識と研究経験を有する方、およびレーザーとその測定手法に深い造詣を有する方を委嘱した。産業界からのアドバイザーに関しては、産学共創の場にご参加いただいた方々と同様に、機器メーカーに近いアドバイザーに関してはレーザーや小型中性子源とその測定法に詳しい方々を、素材メーカーに関しては分析ツールとしての活用に詳しい方々を委嘱した。

表1 アドバイザー

氏名	所属 役職	任期
金子美智代	トヨタ自動車株式会社 未来創生センター R-フロンティア部 2020 ロボット開発室 主査	平成 27 年 10 月～ 令和 2 年 3 月
川嶋利幸	浜松ホトニクス株式会社 中央研究所産業開発研究センター 副センター長	同上
鬼柳善明	名古屋大学 大学院工学研究科 特任教授	同上
佐藤馨	JFEテクノリサーチ株式会社 フェロー	同上
末元徹	公益財団法人豊田理化学研究所 フェロー	同上
林真琴	株式会社神戸工業試験場 茨城事業所日立南工作所 顧問	同上
宮寺晴夫	東芝エネルギーシステムズ株式会社 原子力化学・サイクル技術開発部炉心・燃料サイクル技術担当 グループ長	同上

※所属、役職は技術テーマ終了時の情報に基づく。

2. 追跡調査の概要

(1) 調査の目的

追跡調査は技術テーマ終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST（科学技術振興機構）事業の改善に資することを目的に行うもので、研究終了後から現在までの研究課題の発展状況等を調査した。

(2) 調査の対象

本追跡調査は、研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）産業ニーズ対応タイプ 技術テーマ「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」（中性子源）（平成 27 年度～令和元年度）の採択課題を対象とした。表 2 に追跡調査対象課題を示す。

表 2 追跡調査対象課題（採択課題）

採択年度	終了年度	項番	プロジェクトリーダー（PL） （所属 役職）		研究課題名
H27	H30	01	清水裕彦	名古屋大学 理学研究科 教授	小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像
H27	R01	02	余語覚文	大阪大学レーザー科学研究所 准教授	レーザー駆動中性子源の開発と高速ラジオグラフィへの応用
H27	H30	03	瓜谷章	名古屋大学工学研究科 教授	He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発
H27	R01	04	熊田博明	筑波大学医学医療系 准教授	医療用加速器中性子源技術の産業利用への応用に関する研究
H27	H30	05	高橋浩之	東京大学工学系研究科 教授	中性子フラットパネルディテクタの研究開発
H27	R01	06	山形豊	理化学研究所光量子工学研究センター先端光学素子開発チーム チームリーダー	安全で取扱容易なコンパクト中性子源のためのターゲット・減速体・ビーム輸送系の研究開発
H27	H29	07	長谷川純	東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所 准教授 →ゼロカーボンエネルギー研究所 准教授	慣性静電閉じ込め式可搬型コンパクト熱中性子源の開発

H27	H30	08	林崎規託	東京工業大学 科学技術創成 研究院先導原 子力研究所 教 授 →ゼロカーボン エネルギー研究 所 教授	産業用コンパクト中性子源陽子加 速器システムの小型化開発
H27	R01	09	小泉智	茨城大学理工 学研究科 教授	複合材料の品質管理を目指した小 型中性子源小角散乱イメージング 装置の開発
H27	R01	10	花山良平	光産業創成大 学院大学光産 業創成研究科 准教授	レーザー駆動指向性中性子の発 生・制御及び検出に関する基盤技術 開発

(3) 調査の方法

プロジェクトリーダーに依頼して、研究開発の現状に関する調査票に回答頂いた。回答頂いた 10 課題について本追跡評価用資料をまとめた。回答内容のうち、本追跡評価用資料では、共同研究を実施する企業名、共同研究費等の機密性の高い情報は非公開とした。なお、本追跡評価用資料の公表にあたり、プロジェクトリーダーから記載内容の確認と公表の許諾を頂いた。

3. 追跡調査結果

(1) 研究開発の継続状況

① 継続状況

本技術テーマで実施した研究開発の現在の継続状況を図1に示す。本技術テーマの研究開発課題10課題の内、9課題(90%)が「A. 現在も継続している」と回答している。また、1課題については、「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」としている。

なお、以下の3項目に該当する回答はなかった。

- B. 実用化の目処が付いたため終了した。
- D. 中止した(課題のシーズについて研究開発を断念した)。
- E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している。

全ての研究課題が、当時の研究を継続、もしくは今後再開を予定しており、研究開発を断念した課題はないことから、各研究課題の設定、研究計画は妥当であり、継続的な研究の発展性がある研究課題であったことがうかがえる。

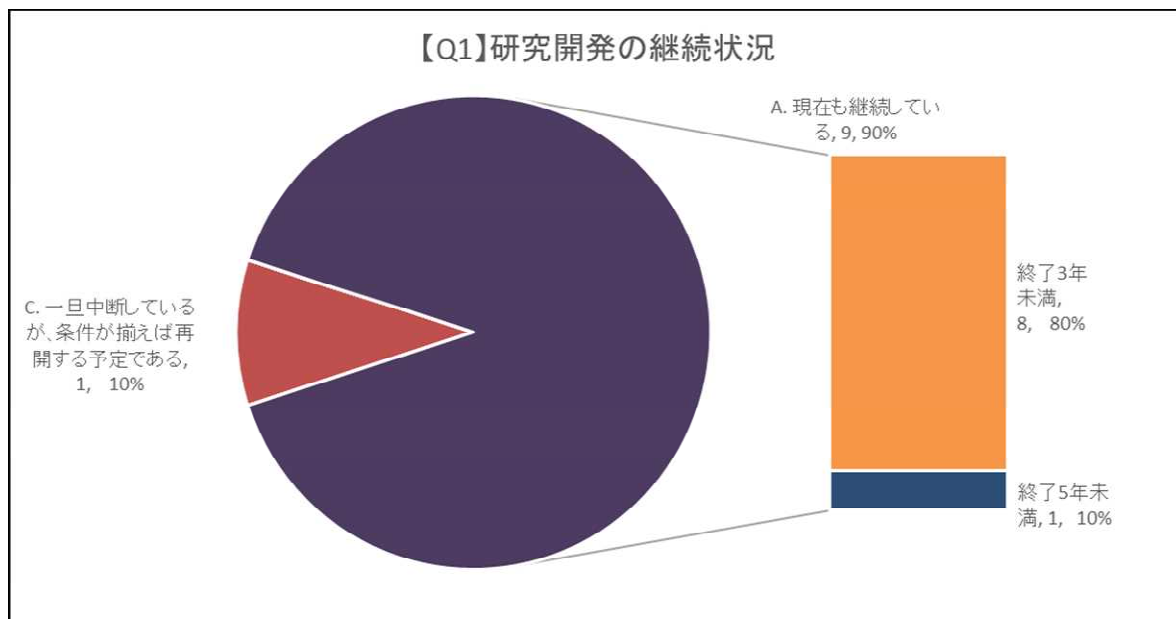


図1 研究開発の継続状況

② 現在の研究開発体制

①で「A. 現在も継続している」と回答した研究課題の現在の研究開発体制を図2に示す。各回答（複数選択可）の課題数は、下記の通りである。現時点で産業応用、実用化に向けて企業との共同研究開発を実施している（選択肢A、及びB）との回答は計3課題（23%）となっている。企業との意見交換を通じて産業界のニーズを把握する場としての産学共創の場が有益であったとの複数の回答をいただいている。

一方で大多数（9課題、69%）は、「E. 自機関での基礎研究（大学との共同研究を含む）」のステージにある。

回答件数（複数選択可）：

A. 産学共同研究開発（産学共創実施中にマッチングした企業）	: 1 課題（8%）
B. 産学共同研究開発（上記とは別の企業）	: 2 課題（15%）
C. 企業単独での開発（産学共創実施中にマッチングした企業）	: 0 課題（0%）
D. 企業単独での開発（上記とは別の企業）	: 0 課題（0%）
E. 自機関での基礎基盤研究（大学等との共同研究含む）	: 9 課題（69%）
F. その他	: 1 課題（8%）

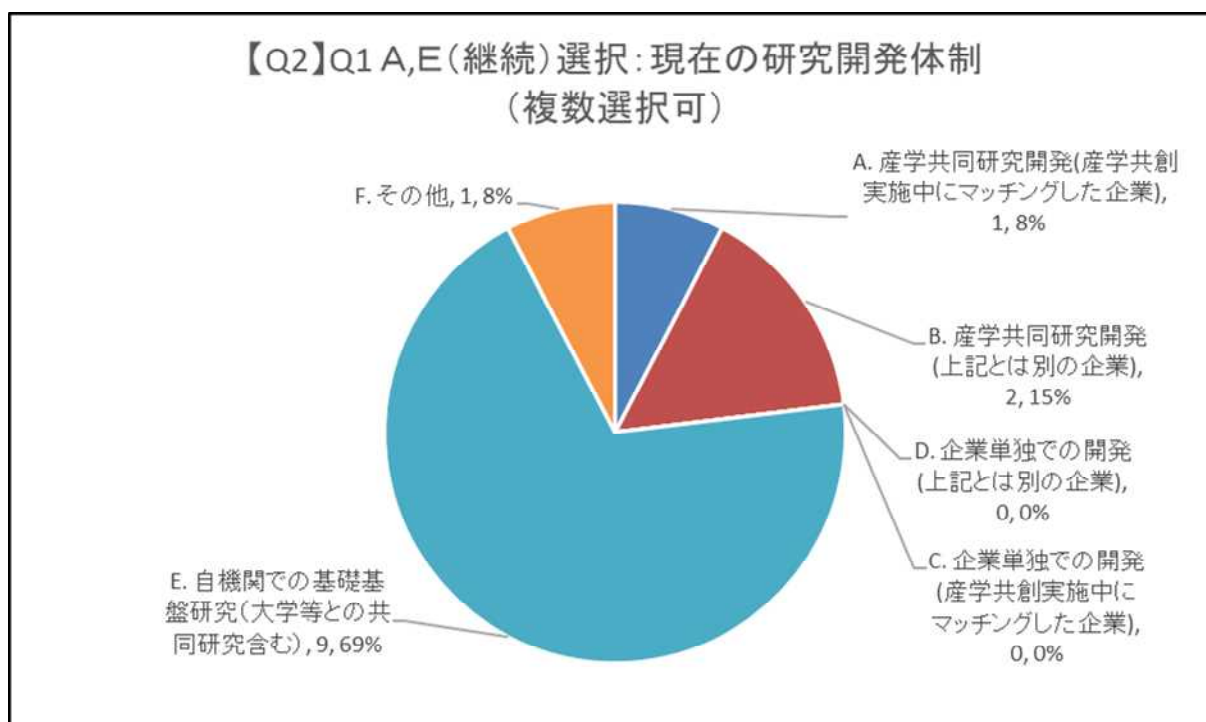


図2 現在の研究開発体制

③ 派生的に創出された成果

研究課題ごとに「(3) 研究開発成果（科学技術や社会・経済への波及効果）」で記載する。

④ 研究の中断・中止の理由

①で「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」と回答した研究課題が研究開発を中断・中止した理由を図3に示す。

該当する研究課題は1課題のみであるが、中断の理由として、「A. 研究開発資金の不足」、「B. 研究開発人材の不足」と回答されている。A-STEPの研究課題終了後の新たな競争的資金などの確保、研究室が取り組んでいる他の研究テーマとの研究要員の割り振りなどに難しさがあったことがうかがえる。

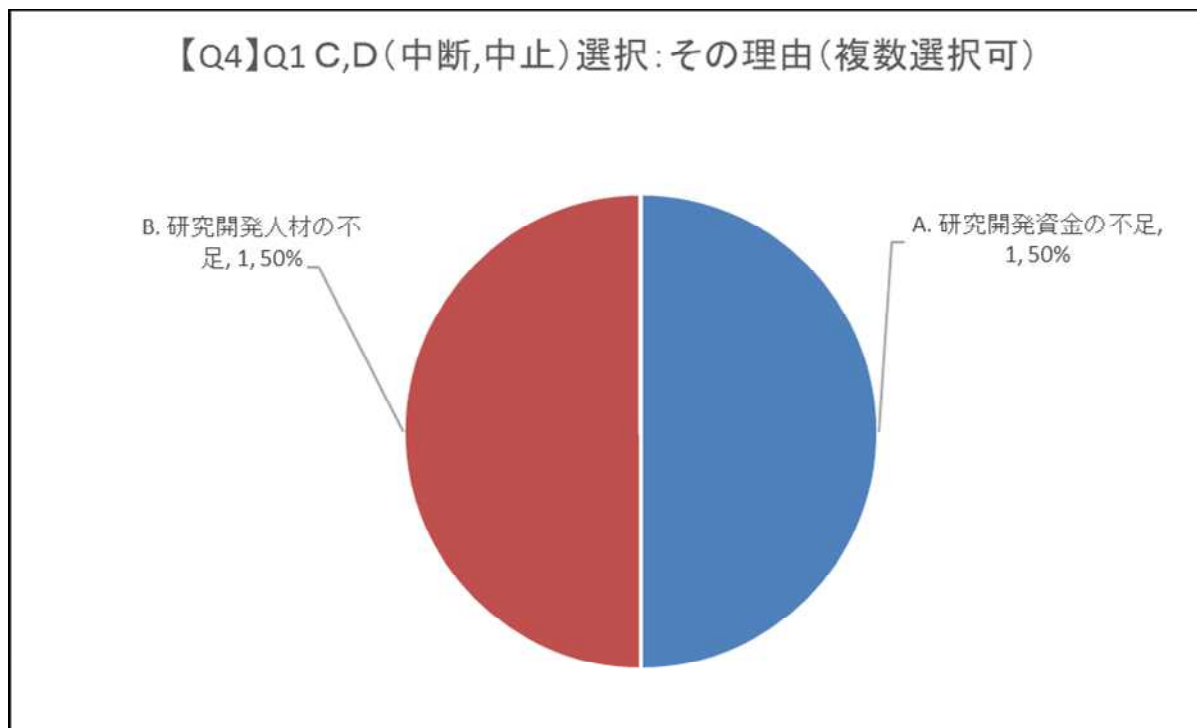


図3 研究中断・中止の理由

⑤ 進捗状況（技術成熟度）

研究開発を継続している場合は現在の、中断・中止した場合はその時点の技術成熟度を図6に示す。各回答の件数は以下の通りである。

1. 基礎研究(発明:基本原理の明確化): 0 課題
2. 基礎研究(発明:技術シーズの形成): 0 課題
3. 基礎研究(可能性検証:要素技術や動作原理の検証): 5 課題 (50%)
4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価): 3 課題 (30%)
5. 応用研究・開発研究(実用性検証:実用環境でのプロトタイプ作製): 1 課題 (10%)
6. 応用研究・開発研究(生産技術開発:実用環境での生産検証): 0 課題
7. 実用化開発(生産技術開発:少量パイロット生産): 1 課題 (10%)
8. 実用化開発(市場投入:生産体制構築): 0 課題
9. 実運用(市場拡大:製品生産・出荷): 0 課題

製品の生産体制の構築の一手手前である「7. 実用化開発(生産技術開発:少量パイロット生産)」のステージに到達している研究課題が1課題(10%)、実使用環境での技術検証に到達している「5. 応用研究・開発研究(実用性検証:実用環境でのプロトタイプ作製)の研究課題が1課題(10%)」、「4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価)」のステージにある研究課題が、3課題(30%)となっている。全体の約半数の研究課題では実用化、あるいは実用化に向けた前段階のステージに到達していることがわかる。一方で、研究課題の半数である5課題(50%)は、「3. 基礎研究(可能性検証:要素技術や動作原理の検証)」の基礎研究のステージにとどまっている。

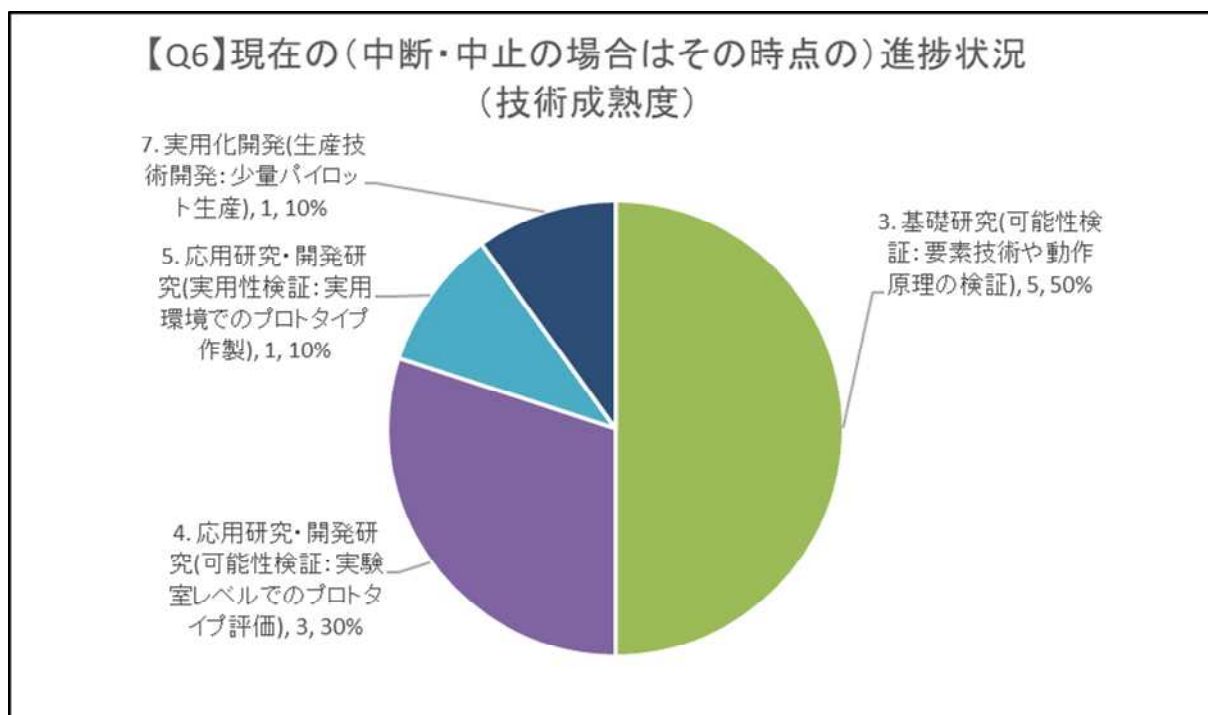


図4 技術成熟度

(2) 研究開発資金等

① 資金の種類

「(1) 研究開発の継続状況 ①継続状況」で「A. 現在も継続している」、「B. 実用化の目処が付いたため終了した」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の、本技術テーマにおける研究開発終了後から現在までの研究開発資金を図5に示す。各回答の課題数は以下の通りである。

回答(複数選択可):

- A. 企業の自己資金で実施: 4課題(37%)
- B. JSTの競争的資金等で実施: 1課題(9%)
- C. JST以外の競争的資金・公的資金で実施: 4課題(36%)
- D. その他の資金で実施(他社からの投融資など): 2課題(18%)

研究課題の終了後は、企業からの資金提供、競争的資金（JST、他の公的資金）により、研究開発を進めている課題が多く約80%を占めている。研究の継続には、企業の資金提供、または、競争的資金等の確保が基本的に重要な要素であることがうかがえる。

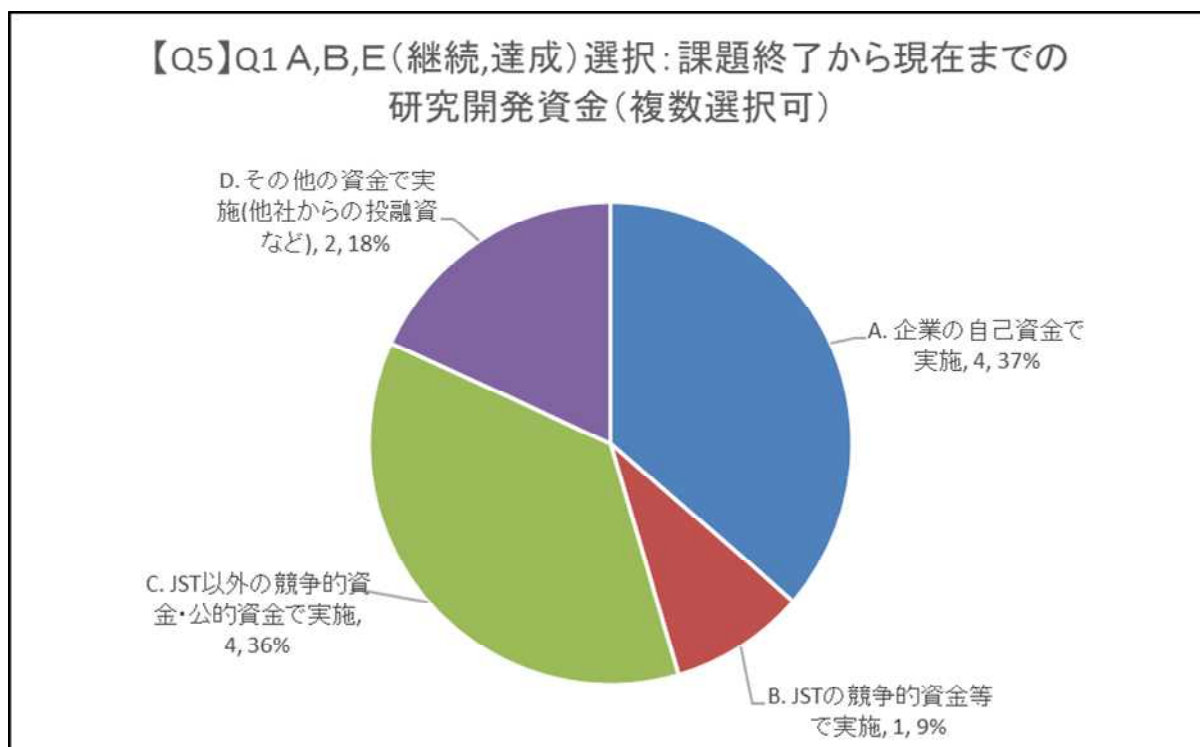


図5 研究開発資金の種別

② 資金の獲得状況（公的研究資金）

本技術テーマにおける研究開発終了後に獲得した公的研究資金のうち現在実施中のものを表3に示す。公的研究資金については、文部科学省 原子力システム研究開発事業のように技術の実用化を前提としたプログラムもあるが、多くはJST 創発的研究支援事業やJSPSの科研費基盤研究などの基礎研究を対象とした資金の利用が多いことがわかる。製品化、産業化に向けた競争的資金のプログラムの利用が少ないのは、終了後の各研究課題の多くが、未だ基礎研究の段階にあるためと推察できる。

表3 公的研究資金リスト

項番	PL	資金の詳細（制度名「課題名」、実施期間、代表者）
01	清水裕彦	京都大学原子炉共同利用 R2138 (2021)
02	余語覚文	(i) 大阪大学レーザー科学研究所 共同利用共同研究 (2021) (ii) JSPS 二国間事業 JPJSBP 120209922 ルーマニア(OP)との共同研究「ニュークリアフォトニクス」研究国際連携 (2020~2021) https://www.jsps.go.jp/j-bilat/semina/data/List_of_Joint_Research_Projects_and_Seminars_R3_J.pdf (iii) JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202K「小型レーザー装置による高指向性スピン偏極熱中性子の直接発生と産業応用研究」、有川安信

		(2021~2027) https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202104006142790567
04	熊田博明	(i) JSPS 科研費基盤研究(B) 「BNCT の患者位置変動に追従する高精度照射システムの開発」 熊田 博明(2020~2023) https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-20H04546/ (ii) JSPS 科研費基盤研究(C) 「加速器 BNCT における日常 QA 測定のための中性子エネルギー分布評価手法の開発」 増田 明彦(2019~2021) https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-19K12638/
05	高橋浩之	文部科学省 原子力システム研究開発事業「可搬型 950keV/3.95MeVX 線・中性子源による福島燃料デブリウラン濃度評価・仕分けとレギュラトリエンス」(2020~2022)、高橋浩之
06	山形豊	(i) JSPS 科研費基盤研究(A) 18H03709 「多入射中性子反射率法の開発とそれによる全固体型リチウムイオン電池のオペランド計測」(2019-2021)、山田 悟史 (ii) JSPS 科研費基盤研究(B) 21H01092 「中性子干渉計を用いた暗黒宇宙の多角的研究」(2021~2023)、北口 雅暁 (iii) Swiss National Science Foundation (2017-2021)

(3) 研究開発成果（科学技術や社会・経済への波及効果）

研究開発成果の科学技術や社会・経済への貢献についての事例を示す。文中には企業との共同研究の内容も記載している。秘密保持の観点から、企業名、研究期間、企業からの共同研究費は非公開としている。

02 余語は、世界で初めてレーザーで冷中性子を発生することに成功した。この成果について、論文（SCIENTIFIC REPORTS 10, 20157 (2020)）を発表するとともに、この基本技術について特許を出願した（PCT/JP2020/031296）。この技術は、1 万分の 1 秒より短い時間に起きるタンパク質の動きやはたらきを、瞬間的に計測できる新しい手法の開発などにつながる成果である。

04 熊田は、元々医療用加速器中性子源として開発していた装置について産業利用の観点での開発、検証を行うことで、より汎用的に使える中性子源の開発を進めてきた。2021 年 11 月から、当該装置を用いた BNCT 非臨床試験を開始し、細胞や小動物に対する照射試験により中性子ビームの生体に対する安全性、ホウ素薬剤投与時の安全性、有効性を検証する。

05 高橋は、開発した ZnS シンチレーター直接結合型のフラットパネル検出器について、企業と中性子イメージングを利用した大型構造物の検査を計画し研究を進めている。また glass-GEM 型については、炭素イオンビームによる癌治療用途に向けて線量計測用として well-type（井戸型）の glass-GEM の技術展開を進めている。これらフラットパネル検出器について、2019 年の日本中性子科学会技術賞を受賞した。また、time-of-flight 法に対応できる時間応答性を改良したフラットパネル検出器について特許を出願した。

06 山形は、開発した金属中性子ミラーが J-PARC MLF の中性子反射率計 SOFIA で設備化され実用に供された。従来の方法と比べて中性子ビームをおよそ倍の強度で集束させることに成

功している。今回実用化した超精密集束ミラーは世界最高レベルの性能を実現しており、Li電池の電極試料はもとより、燃料電池や有機EL等の様々なデバイスへの中性子反射率法を用いたリアルタイム計測への活用が期待できる。この金属中性子ミラーについては、理化学研究所より、既に国内研究機関向け4件、海外研究機関向け1件へ金属中性子ミラーを出荷、提供している。また他の海外研究機関からも供給の打診があり、国内外の中性子利用施設からキーデバイスとして期待されている。なお「中性子集光ミラーのための超平滑な曲面を有する金属基盤の開発」について2021年の日本中性子科学会技術賞を受賞した。

08 林崎は、加速器駆動の次世代コンパクト中性子源の研究開発を理化学研究所とともに推進中。車載可能なサイズの500MHz駆動RFQが搭載された可搬型加速器中性子源RANS-Ⅲの開発が進んでいる。

09 小泉は、本研究課題で開発した「小型中性子源小角散乱装置」を活用し、マッピング可視化装置へと発展させる研究を進めている。このアイデアに基づき特許出願をした（特願2021-080712）。また、分析サービスのビジネス化、小角散乱実験を高速化する機械学習技術などについて企業との連携を進めている。

（4）主な研究活動（主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等）

① 主要論文

本技術テーマにおける研究開発終了後に発表した論文のうち、研究代表者から回答のあった主要な査読付き論文（10報程度まで）を示す。【 】内の記載は、研究代表者が主要論文として選定した理由等である。

・01 清水

(i) K.Hirota et al., "Design and Construction of Imaging Beamline at Nagoya University," EPJ Web of Conf. 231, 05002 (2020).
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202023105002>

(ii) H. N. Shimizu and K. Hirota, "Characterization of Neutron Beam Applications," EPJ Web Conf. 231, 05005 (2020). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023105005>

(iii) K.Hirota et al., "Neutron Imaging using a Fine-grained Nuclear Emulsion," J. Imaging 7, 00004 (2020). <https://doi.org/10.3390/jimaging7010004>

・02 余語

(i) Akifumi Yogo, Seyed Reza Mirfayzi, Yasunobu Arikawa, Yuki Abe, Tianyun Wei, Takato Mori, Zechen Lan, Yuki Hoonoki, Daniil O. Golovin, Keisuke Koga, Yosuke Suzuki, Masato Kanasaki, Shinsuke Fujioka, Mitsuo Nakai, Takehito Hayakawa, Kunioki Mima, Hiroaki Nishimura, Satyabrata Kar, Ryosuke Kodama, "Single shot radiography by a bright source of laser-driven thermal neutrons and x-rays," APPLIED PHYSICS EXPRESS 14(10) 106001-1-106001-4 (2021). 【プレス発表、掲載誌の上位約5%が選ばれる Spotlights に選出】 <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac2212>

- (ii) Takato Mori, Akifumi Yogo, Takehito Hayakawa, Seyed R. Mirfayzi, Zechen Lan, Yuki Abe, Yasunobu Arikawa, Daniil Golovin, Tianyun Wei, Yuki Honoki, Mitsuo Nakai, Kunioki Mima, Hiroaki Nishimura, Shinsuke Fujioka, Ryosuke Kodam "Direct evaluation of high neutron density environment using (n, 2n) reaction induced by laser-driven neutron source," *Physical Review C* 104(015808) 015808–1–015808–9 (2021).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.015808>
- (iii) D.O. Golovin, S.R. Mirfayzi, S. Shokita, Y. Abe, Z. Lan, Y. Arikawa, A. Morace, T.A. Pikuz, A. Yogo "Calibration of imaging plates sensitivity to high energy photons and ions for laser-plasma interaction sources," *Journal of Instrumentation* 16(02) T02005–T02005 (2021). DOI:10.1088/1748-0221/16/02/T02005
- (iv) 余語覚文「小特集 ターゲット表面プラズマ密度制御による電子・イオン加速の物理とレーザーパルスコントラスト制御技術 「3. μm 厚ターゲットからのイオン加速」 プラズマ核融合学会誌 96(12) 706–709 (2020).
- (v) S. R. Mirfayzi, A. Yogo, Z. Lan, T. Ishimoto, A. Iwamoto, M. Negata, M. Nakai, Y. Arikawa, Y. Abe, D. Golovin, Y. Honoki, T. Mori, K. Okamoto, S. Shokita, D. Neely, S. Fujioka, K. Mima, H. Nishimura, S. Kar, R. Kodama "Proof-of-principle experiment for laser-driven cold neutron source," *SCIENTIFIC REPORTS* 10, 20157 (2020)
 【特許】、【プレスリリース : https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20201130_1】
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-77086-y>
- (vi) Y. Abe, T. Johzaki, A. Sunahara, Y. Arikawa, T. Ozaki, K. Ishii, R. Hanayama, S. Okihara, E. Miura, O. Komeda, S. Sakata, K. Matsuo, H. Morita, R. Takizawa, R. Mizutani, A. Iwamoto, H. Sakagami, Y. Sentoku, H. Shiraga, M. Nakai, S. Fujioka, Y. Mori, Y. Kitagawa "Monte Carlo particle collision model for qualitative analysis of neutron energy spectra from anisotropic inertial confinement fusion," *High Energy Density Physics* 36 (2020). DOI 10.1016/j.hedp.2020.10080
- ・ 04 熊田
- (i) Kumada, H et al., "Evaluation of the characteristics of the neutron beam of a linac-based neutron source for boron neutron capture therapy," *Applied Radiation and Isotopes*, 165, 109246, 1–6, (2020), 【IF: 1.513】
 DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109246
- ・ 05 高橋
- (i) Takeshi Fujiwara, Yusuke Koba, Yuki Mitsuya, Riichiro Nakamura, Ryuta Tatsumoto, Shuto Kawahara, Keisuke Maehata, Hidetoshi Yamaguchi, Weishan Chang, Naruhiro Matsufuji, Hiroyuki Takahashi, "Development and characterization of optical readout well-type glass gas electron multiplier for dose imaging in clinical carbon beams," *European Journal of Medical Physics – Physica Medica*, Vol. 82, pp. 72–78. (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.01.068>

・ 06 山形

(i) Yamada, N. L., Hosobata, T., Nemoto, F., Hori, K., Hino, M., Izumi, J., Suzuki, K., Hirayama, M., Kanno, R. & Yamagata, Y., “Application of precise neutron focusing mirrors for neutron reflectometry: latest results and future prospects,” *J. Appl. Cryst.* 53 (2020). <https://doi.org/10.1107/S1600576720013059>

(ii) Funama, F., Hino, M., Oda, T., Endo H., Hosobata T., Yamagata Y., and Tasaki S., “Observation of TOF-MIEZE Signals with Focusing Mirrors at BL06, MLF, J-PARC,” *J. Synch. Investig.* 14, S50-S55 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1027451020070149>

・ 07 長谷川

(i) Tomonobu Itagaki, Jun Hasegawa, and Eiki Hotta: “Investigation of Ion Generation Rates in an Inertial Electrostatic Confinement Device by Spectroscopy-based Inverse Analysis,” *Plasma and Fusion Research*, 15, 1206070, (2020). <https://doi.org/10.1585/pfr.15.1206070>

(ii) 板垣智信, 堀田栄喜, 長谷川純, 高倉啓, 田端真之介, 松枝泰志, “直線型慣性静電閉じ込め核融合中性子源における放電特性と中性子出力の陽極形状依存性,” *電気学会論文誌 A*, Vol. 140, No. 9. p.464-472, (2020). <https://doi.org/10.1541/ieejfms.140.464>

(iii) K. Takakura, T. Sako, H. Miyadera, K. Yoshioka, Y. Karino, K. Nakayama, T. Sugita, D. Uematsu, K. Okutomo, J. Hasegawa, T. Kohno, E. Hotta, “Neutron Radiography Using Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion,” *Plasma and Fusion Research*, 13, 2406075 (2018). <https://doi.org/10.1585/pfr.13.2406075>

・ 08 林崎

(i) Ikeda Shota, Yoshie Otake, Kobayashi Tomohiro, Hayashizaki Noriyosu. “Design of 500 MHz RFQ linear accelerator for a compact neutron source, RANS-III,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 461, pp. 186-190, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.09.051>

(ii) Noriyosu Hayashizaki, Shota Ikeda, Aki Murata. ” Development of a downsized proton accelerator system for compact neutron sources,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 461, pp. 243-246, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.09.053>

(iii) Tomohiro Kobayashi, Shota Ikeda, Yoshie Otake, Yujiro Ikeda, Noriyosu Hayashizaki, ” Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 994, 165091, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165091>

・ 10 花山

(i) Akihiro Yamaji, Shinnosuke Yamato, Shunsuke Kurosawa, Masao Yoshino, Satoshi Toyoda, Kei Kamada, Yuui Yokota, Hiroki Sato, Yuji Ohashi and Akira Yoshikawa ,” Crystal growth and scintillation properties of carbazole for neutron detection,” IEEE TNS 67(6) pp.1027 – 1031, (2020). 【IF:1.57】
DOI: 10.1109/TNS.2020.2996276

② 特許

本技術テーマにおける研究開発終了後の特許出願、特許登録を示す。

・ 02 余語

- (i) 【発明の名称 EN】 NEUTRON GENERATION APPARATUS AND NEUTRON GENERATION METHOD
【発明の名称 JA】 中性子発生装置及び中性子発生方法
【国際出願番号】 PCT/JP2020/031296
【国際出願日】 2020. 08. 19
【国際公開番号】 WO/2021/039541
【国際公開日】 2021. 03. 04
【優先権情報】 2019-155773 (2019. 08. 28)
【移行に関する情報】 なし。
【出願人】 国立大学法人大阪大学 OSAKA UNIVERSITY,
大学共同利用機関法人自然科学研究機構 INTER-UNIVERSITY RESEARCH INSTITUTE
CORPORATION NATIONAL INSTITUTES OF NATURAL SCIENCES

・ 04 熊田

- (i) 【発明の名称】 中性子発生用ターゲット、中性子発生装置、中性子発生用ターゲット
の製造方法及び中性子発生方法
【出願番号】 特願 2015-011752
【出願日】 平成 27 年 1 月 23 日 (2015. 1. 23)
【出願人】 国立大学法人 筑波大学、「企業」
【登録番号】 特許第 6713653 号
【登録日】 令和 2 年 6 月 8 日 (2020. 6. 8)

・ 05 高橋

- (i) 【発明の名称】 フラットパネル検出器
【出願番号】 特願 2020-91419
【出願日】 令和 2 年 5 月 26 日 (2020. 5. 26)
【公開番号】 特開 2021-188933 (P2021-188933A)
【公開日】 令和 3 年 12 月 13 日 (2021. 12. 13)
【出願人】 国立大学法人 東京大学

・ 09 小泉

- (i) 未公開国内出願 1 件

③ 受賞

本技術テーマにおける研究開発終了後の受賞歴を表4に示す。

表4 受賞リスト

項番	PL	受賞者	賞の名称（授与機関）	受賞年月
04	熊田博明	熊田博明	The Hubbel Award (Applied Radiation and Isotopes)	2021. 10
05	高橋浩之	藤原健 高橋浩之	日本中性子科学会技術賞 (日本中性子科学会)	2019. 11
06	山形豊	山形豊 細島拓也	日本中性子科学会技術賞 (日本中性子科学会)	2021. 12
10	花山良平	黒澤俊介	令和3年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	2021. 4

④ 報道

本技術テーマにおける研究開発終了後の取材実績を表5に示す。

表5 取材リスト

項番	PL	取材対応者	内容	公開年月
02	余語覚文	余語覚文	日刊工業新聞「阪大、レーザー中性子X線 で同時撮像」	2021. 9. 16
02	余語覚文	余語覚文	中日新聞福井版「見えない高速現象撮 像、中性子とエックス線同時生成」	2021. 6. 20

(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等

今回の追跡調査では、産学共創の場で、企業、産業界からの要望や意見を直接に聞き取ることができたことは有用であったとの意見が多かった。また、これまで主に基礎的な研究を進めてきた研究者からは、どのような考え方でニーズを捉えたら良いかという点について、日頃の研究とは異なる観点が重要であることを実感できたとの回答もあった。

産学共創の場で、アドバイザー、他の研究チーム、産業界からの参加者とのオープンな議論を通じて、産業界のニーズを確認し、それに基づき研究目標や計画へ反映する機会を得たことは、A-STEPの各研究課題の終了後の新たな研究プロジェクトの計画、提案や企業と共同研究を進める上でも、研究者にとって有用な経験、知見となり、また励みにもなったとの回答もあった。

具体的な回答例を以下に示す。

- ・産学共創の場での、研究課題間、企業との情報交換は大変有意義だった。
- ・産学共創の場で、企業からの要望や意見を直接聞き取ることができたことが画期的であった。
- ・課題実施中に毎年、産学共創の場が開催され、アドバイザー、他チーム、産業界からの参加者とオープンな議論ができたことは非常に参考となり、また、励みにもなった。
- ・産業分野におけるニーズを把握できた点、特にどのような考え方でニーズを捉えたら良い

かという点について、研究とは異なる観点が重要であることを実感できた点が有用であった。

- ・元々医療用加速器中性子源として開発していた装置について産業利用の観点での開発を行うことで、より汎用的に使える中性子源開発ができた。この事業によって装置開発も加速した。
- ・技術の追求を行うことで、これまでに行われていなかった分野の研究を展開することができたことはよかった。

4. 総合所見

本技術テーマは、小型中性子源及びそれを用いた応用計測システムの要素技術の実用化を目指す研究開発であった。技術テーマ終了後2年を経過した現時点では、小型中性子源の計測システムとして各要素技術を体系化して利用するには未だ至っていないが、個別の要素技術については、技術テーマ終了後の研究の発展、展開により以下の成果を得ている。

- ・金属中性子ミラーが J-PARC MLF の中性子反射率計 SOFIA に実装され、国内外の中性子研究施設にも提供されるなど実用化が進みつつある。
- ・インフラ、産業計測用途の次世代小型加速器中性子源 RANS-Ⅲについては、理化学研究所と東京工業大学で共同研究が進んでおり、技術開発が着実に進められている。
- ・筑波大学の加速器中性子源については、BNCT 用途での非臨床試験での利用が開始され、安全性試験、薬剤の有効性試験等が計画されている。
- ・検出器については、フラットパネル検出器は、大型構造物検査などにも利用可能なものであり、企業との連携の下で産業利用の検討が進みつつある。
- ・小型中性子源小角散乱装置については、マッピング可視化装置への展開が企業との連携を含めて検討されている。
- ・レーザー駆動中性子源による冷中性子発生については、原理的な実証のステージではあるが、基本特許が出願されており、今後の高出力パルスレーザーの技術進展により、実用展開が期待されている。

各研究課題の現在の研究体制については、全研究課題10課題のうち、9課題が当該研究課題の研究を継続しており、現時点で企業との共同研究の実施は3課題である。これ以外の課題は自機関（及び他大学との共同研究）で研究を継続している状況であり、さらなる企業との共同研究の推進が望まれる。

産業界、企業が製品開発、機器導入に踏み込むには、技術を製品化前提でよりブラッシュアップすること、事業性、市場性を検証する取り組みが必要である。技術テーマ終了時に要素技術として産業利用の可能性が見えていても、これらの点がクリアできるところまで、もう少しアカデミア主体で研究の完成度を高め、大きな開発を可能とする支援プログラムの枠組みがあるとよいとのコメントを今回の調査でもいただいている。優れた研究成果については、研究課題の終了後に適切な次のステップの支援プログラムにつなげていく道筋を作ることが重要な課題である。この点では、例えば原理実証ステージにある大阪大学のグループが JST 創発的研究支援事業に採択され、レーザー駆動中性子源の産業応用の基礎研究を継続されているが、各研究の現状のステージに対応した中期的な視点での支援が望まれている。

また、A-STEP のプログラムの事務手続き等については、報告書等を word や excel 等の書

式ではなく、例えば web 経由で入力するような IT を活用した様式で、項目間の関連や整合性の確認が容易に行えるような方式となるとより良いとの要望があった。IT を活用し研究者の事務的な負担を軽減することについては、既に JST の一部のプログラムで試行が進められているが、今後のプログラム運営の課題の一つである。

研究開発のその後の進展に対する本プログラムの効果については、調査の回答から、本プログラムの特徴である産学共創の場が、研究者にとっては産業界や企業のニーズを知る機会となり、また企業にとっては各研究を具体的に知ることができるよい機会となったことがわかる。研究開発課題の終了後も企業との共同研究に取り組む上でこれらの経験、知見は研究者にとって有益であったと推察される。

2020 年の年初を起点とする COVID-19 感染拡大による影響については、一部の研究者から自機関の研究、他機関の実験設備を利用する実験などが計画通りに進められないことがあったとの回答があった。また開発した技術の企業への技術移転を進めたいが、企業との面談の機会が大きく減少し、取り組みが停滞しているとの回答があった。一方で、遠隔会議の急激な普及により、国際会議への参加や国外の研究協力者との打合が容易になった面、研究の方法論を考察する時間的余裕が取れた点など with コロナの研究スタイルの肯定的な面の回答もあった。企業との共同開発や技術移転の調整は、交渉を伴うため、遠隔会議では難しさを当初は感じるかもしれないが、状況に応じて積極的に活用していくことが、with コロナの時代では必要となるであろう。

中性子を利用した解析・計測技術は次世代の二次電池や燃料電池開発、磁気材料、鉄鋼材料の構造解析、タンパク質の構造解析、インフラ施設の点検など基礎科学分野から先端産業における製品開発、インフラの維持管理まで多岐にわたる。今後、産業界への中性子利用を拡大させるためには研究用原子炉施設や J-PARC 等の大型施設での精密測定のみならず、小型、簡便、低コストな測定を可能とする様々な中性子計測システムが必要となってくる。ここ数年、欧州でも、研究用原子炉の補完施設としての中小型中性子源の計画が進展しつつあり、日本の小型中性子源の研究は注目されてきた。今後も日本国内の研究機関での継続的な研究開発と中性子施設の拠点連携を進めることが解析・計測技術を基盤とする産業競争力強化の観点からも重要である。日本中性子科学会や学術会議の分科会等でも議論、検討が進められているが、この技術分野を計画的に支援するプログラムの設定が期待されている。

最後に、今回の追跡調査にご協力をいただきましたプロジェクトリーダー、共同研究者の先生方へ感謝を申し上げます。研究者の先生方のご研究が益々発展されますことを祈念いたします。

以上