

**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」**

技術テーマ事後評価用資料

令和2年5月

目 次

1. 技術テーマ	3
2. プログラムオフィサー (P0)	3
3. 採択課題	4
4. 技術テーマのねらい (目標)	7
(1) 技術課題解決に向けた考え方	7
(2) P0 の目標	7
(3) 「産学共創の場」の活用方針	8
5. 研究課題の選考について	9
(1) 選考の方針	9
(2) 採択課題の構成	9
6. アドバイザーの構成について	11
(1) 人選にあたっての考え方	11
7. 技術テーマのマネジメントについて	12
(1) P0 の運営方針	12
(2) 技術テーマの進捗状況の把握	12
(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要	12
(4) 研究課題の評価と指導	14
(5) 課題中間評価における評価基準 (研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠) ..	14
(6) 研究費の配分	14
(7) 「産学共創の場」の推進と活用	14
(8) アウトリーチ活動	15
8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況	16
(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況	16
(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果	16
(3) 個別の産学共同研究への発展状況	17
(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等	18
(5) 今後のプログラム運営への提言	19
9. 総合所見	20

1. 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」(平成 27 年度発足)

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なのです。

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源の基盤技術の確立と実証研究を推進します。

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す。ここでは、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ます。

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ます。

2. プログラムオフィサー (P0)

吉沢 英樹 (一般財団法人放射線利用振興協会 東海事業所中性子利用技術部 参与、
東京大学 名誉教授)

3. 採択課題

本プログラムの目標は、第1章「技術テーマ」に記しているように、小型中性子線源を用いる自己完結した測定・分析システムの開発である。そのためには中性子発生源の開発はもとより、小型中性子源に適合する中性子ビーム制御・検出器、測定データ分析手法と、すべての段階の要素技術が開発されなければならない。従って、本プログラムでは最上流から最下流まで、測定・分析システムを構成するすべての段階の要素技術に係わる研究開発課題を網羅的に採択することとした。

採択した10課題は表1に示す通りであり、その内訳は第5章の表2にカテゴリー毎に分類して示しているように、中性子発生用線源6課題（レーザー駆動方式2課題、加速器駆動方式3課題、慣性静電閉じ込め方式1課題）、検出器・測定手法分析3課題、中性子ビーム制御（ターゲット、モデレータ、冷中性子源開発）1課題である。各課題が目標とする要素技術はそれぞれに異なっているが、いずれの課題も採択されるに十分な魅力あふれる開発目標を掲げていた。また、課題の構成規模も大小様々であり、各課題の中には単一の要素技術の開発に目標を限定する課題もあれば、複数のサブ課題から構成される総合的な大型課題も含まれている。例えば、課題番号08は、加速器駆動方式の中性子発生源用の小型加速器の開発のみに開発目標が絞込まれた課題であり、この課題で謳われている超小型加速器の開発に成功すれば4tトラックに搭載可能な可搬型小型中性子源の実現が期待される。一方、課題番号02は、レーザー駆動方式による中性子発生源の開発課題であり将来のレーザー駆動中性子源に必要とされる中性子発生法を確立し、それに適合するレーザーの仕様を決定することを目指す課題である。しかし多様なサブ課題を包含しており、レーザーにより発生されたMeVレベルの中性子を物性測定に使用されるmeVレベルの中性子へと変換するモデレータや冷中性子源の開発、更にはレーザー駆動中性子源の特徴を活かす専用の高速中性子用検出器の開発とそれを用いた中性子ラジオグラフィの実証実験までを含んでいる。従って、この課題が十分に継続されて完結すれば実用的なレーザー駆動中性子源とラジオグラフィ撮像システムが完成されることが期待される。

以下に、採択した10課題の概要を略記する。

・課題番号01の「小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像」では、静電型陽子加速器とホウ素捕捉療法用の第1ビームラインからなるシステムに燃料電池開発用の第2ビームラインを建設し中性子透過像の撮像研究を推進する。

・課題番号02の「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」では、レーザー駆動方式に係わる中性子発生法として知られている3手法を精査して小型中性子源に採用すべき最適な手法を絞り込む。また、その手法に必要なレーザーの仕様を決定する。さらに、MeVレベルのエネルギーを持つ高速中性子を用いたラジオグラフィ用検出器を開発する。

なお、3種類の中性子発生法とは、(1)光核反応、(2)イオンビーム核融合反応、(3)軽元素核反応である。(3)の軽元素核反応では、まず第1段でレーザー光により陽子・重陽子を発生させ、次に第2段で陽子・重陽子をBeに入射して、 $p(d)\text{-Be}$ 核反応により中性子を発生させる手法であり、陽子・重陽子を発生させる部分をピッチャー(pitcher)、中性子を発生させる部分をキャッチャー(catcher)と言うため、この方式を別名ピッチャー・キャッチャー方式と言う。

・課題番号03の「 He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発」では、我が国で開発された透

明樹脂中に小片状 Eu:LiCaAlF₆ 中性子シンチレータを分散させた TRUST (Transparent RUBber SheeT) (以下 TRUST LiCAF と略記する) を用いて、1 次元位置敏感型検出器を開発する。また、TRUST LiCAF シンチレータは機械的柔軟性を有するため、その特徴を活かして粉末回折パターン測定に適する円環状検出器を開発する。

・課題番号 04 の「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」では、医療用加速器のモデレータ部を改造して材料研究に適用可能な熱中性子ビームを発生できるようにする。また、加速器系を高度化して陽子電流 5mA での運転を可能にする。

・課題番号 05 の「中性子フラットパネルディテクタ開発」においては、ボロンコンバータ、電子増幅型ガスシンチレータ、および大面積受光素子パネルの組合せによる中性子用大面積フラットパネル型検出器(neutron Flat Pannel Detector: nFPD)を開発する。

・課題番号 06 の「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」においては、普及用小型中性子源に必要とされる低放射化中性子ターゲット・モデレータ、冷中性子源、および 3 次元楕円体型中性子ビーム集光ミラーを開発する。

・課題番号 07 の「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」では、慣性閉じ込め方式の小型中性子源において、従来より 1 桁高い中性子束（フラックス）を発生可能な小型中性子源を開発する。

・課題番号 08 の「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」では、車載可能な超小型中性子源を開発するために必要となる全長 3m 程度の超小型陽子加速器を開発する。

・課題番号 09 の「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」では、ピンホールコリメータとシリコン完全結晶の応用を取り入れた小型中性子源用小角散乱装置を開発し、その分光器系を用いて CCD カメラによるラジオグラフィ手法を開発する。

・課題番号 10 の「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」では、レーザー駆動方式におけるピッチャー・キャッチャー方式の中性子発生装置を開発して、研究協力企業の所有する既存のレーザーと組み合わせることにより、レーザー駆動方式による中性子ビームの連続発生を実証する。

表 1 採択課題

採択年度	終了年度	課題番号 末尾 2 桁 (項番)	研究代表者 (所属 役職)	研究課題名
H27	H30	01	清水 裕彦 (名古屋大学 大学院理学研究科 教授)	小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像
H27	R1	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 大学院工学研究科 教授)	He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発

H27	R1	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 大学院工学系研究科 教授）	中性子フラットパネルディテクタの研究開発
H27	R1	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）	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）	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	R1	09	小泉 智（茨城大学 大学院理工学研究科 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	R1	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

4. 技術テーマのねらい（目標）

（１）技術課題解決に向けた考え方

中性子線は分析・解析ツールとして X 線と相補的な有用な特徴を持つ量子ビームの一つであるが、その発生源は大型研究用原子炉や大型加速器施設に限られており、X 線発生源のように研究施設の実験室や開発現場の工場等で使用可能な小型中性子源は実用化されていない。また研究用の小型中性子源は存在してはいるものの、その中性子線束（フラックス）が著しく低いため大型中性子源で使用可能な分析・解析手法をそのまま適用することが出来ない。このため、本プログラムの開始年（平成 27 年(2015 年)）の段階において、中性子線の産業利用は言うまでも無く大学や研究機関へさえも小型中性子源はほとんど普及しておらず、僅かに加速器駆動小型中性子源を活用した鉄鋼材料関連への応用の実証研究が理化学研究所や北海道大学で始まっていたと言う状況であった。

そこで本プログラムでは、産業利用に適した小型中性子源と測定・分析手法を確立することを解決すべき「技術テーマ」として設定する。さらに中性子の発生方式としては加速器駆動に限定せず、小型中性子源の可能性を幅広く広げるためにレーザー駆動方式や慣性静電閉じ込め方式の小型中性子源開発も視野に入れる。一方、中性子束（フラックス）の低い小型中性子源の測定・分析手法の確立の方向性としては、先行する理化学研究所や北海道大学の研究分野と相補的になることに配慮して、本プログラムでは鉄鋼材料以外の用途に適用できる様々な要素技術を開発することを支援する方針を採ることとした。

（２）PO の目標

前節（１）で述べた技術課題解決に向けた考え方に基づいて、開発研究を成功させるために PO として以下のような目標を立ててプログラムを運営する。

まず「技術テーマ」が産業利用を目的とする新たな測定・分析ツールを普及させる測定・分析システムの開発であることに留意して、前章「3. 採択課題」で記したようにシステム一式を構成するすべての要素技術を網羅すべく小型中性子発生源の開発から、検出器の開発、特定の応用分野を切り拓く測定分析手法の開発、さらに中性子ビーム制御（中性子発生ターゲット、中性子エネルギー変換デバイスであるモデレータおよび冷中性子源）まで、可能な限り多数の研究課題を採択する。

小型中性子源の開発のカテゴリーでは、第一に小型加速器開発においては、加速器の開発段階に応じた達成目標を要請する。加速器の開発が先行している課題においては安定的な長時間運転の実績を積み重ねること、および発生した中性子ビームを他のビーム輸送・検出課題に提供して将来の中性子ビーム提供施設としての安定供給の経験を積む。新規開発加速器では、実験室据え置き型および車載可能な移動型中性子源の開発へと繋がる超小型化を目指す。レーザー方式と慣性静電閉じ込め方式を提案する課題チームに関しては、簡易なイメージング記録手法を応用して、提案方式による中性子ビームの発生と中性子イメージング測定を経験することを要請する。この経験により、中性子検出やデータ分析までを視野に入れた測定・分析ツールに必要とされる小型中性子発生源の開発へと開発目標を先鋭化する。

中性子検出器の開発課題では、既に実用段階に有り J-PARC や JRR-3 で使用されているヘリウム 3 ガス型検出器は、ヘリウム 3 ガスが高騰しているため将来の産業利用用の安価な普及型小型中性子源システムの検出器としては不向きであると判断し、ヘリウム 3 ガスを用いない検出器の開発を目指す。また、小型中性子源の産業利用で高いニーズが期待される撮像手法に適した 2 次元検出器の開発を目指す。一方、測定分析手法の開発課題においては、先行する鉄鋼材料分析とは一線を画し、生活素材としての高分子材料の開発研究に適用可能な測定手法を開発する。具体的には、高分子材料に適した小型中性子源小角散乱法の実証試験

を行う。

中性子ビーム制御（ターゲット、モデレータ、冷中性子源）の課題においては、中性子発生源で生成される MeV エネルギーレベルの中性子を産業利用で必要とされる meV エネルギーレベルへと変換するモデレータや冷中性子源の開発を目指す。

本プログラムとしては、これら複数の課題を総合することにより測定・分析システムを構成する一連の要素技術の確立を図る。本プログラムの最終目標は、個々の要素技術の確立により、産業利用可能な小型中性子源の実現への道筋を付けるとともに、その産業利用の先行事例を生活素材分野において創造することで、現実的な産業利用のイメージを創出することである。

（３）「産学共創の場」の活用方針

産学共創の場には、小型中性子源の開発に協力する機器メーカーと、分析ツールとして中性子や X 線を使用する経験を有する素材メーカーの研究者の方々にご参加していただいた。なお、小型中性子源の産業利用の普及のためには、安価な小型中性子源の実現と、それを用いた測定・分析手法の確立、その手法の適用可能な産業分野の顕在化のすべてが必要であるが、小型中性子源に関しては、そのいずれもが実現していない状況である。従って、ご参加いただいた機器メーカーの方々には、個別の要素技術の開発の進展に資するご意見をいただく事を期待した。一方、素材メーカーの方々には、測定・分析ツールとしての小型中性子源への期待と利用ニーズの方向性を明らかにするアドバイスをしていただくこと、および産業利用を目的とする小型中性子源の開発の方向性を明確化するために資するニーズに係わる現場の声を開発担当者へ届けていただく事を期待した。

5. 研究課題の選考について

(1) 選考の方針

本プログラムにおいて、前章「4. 技術テーマのねらい」第2節「(2) PO の目標」に適合する開発目標を掲げる課題提案を公募したところ、中性子発生源から中性子検出、測定・データ分析手法まで、それぞれの段階に係わる38件の応募があった。可能な限り多数の開発提案を採択したかったが、予算の上からも運営の上からも採択できる課題数は制限せざるを得ない。そこで、上流から下流まで様々な段階の要素技術の開発を提案する10件の課題を採択することとした。課題審査においては、測定・分析システムとして完成させるために必要な中性子発生源から中性子ビーム制御、中性子検出器、測定分析手法まで、それぞれの段階に係わる課題を網羅することを選考方針とした。また、技術テーマの解決方針に鑑み、産業利用に適した普及型の測定・分析ツールに組み込まれていることが相応しい要素技術の開発を目指す課題であることを重視することとした。中性子発生源開発に関しては、加速器駆動方式、レーザー駆動方式、慣性静電閉じ込め方式の3方式をそれぞれ最低1件は採択した。一方、価格が高騰するヘリウム3ガスを使用する検出器の開発課題や超電導技術を応用する最先端の高度な検出器開発の課題はさけ、シンチレータ型検出器の開発課題を優先的に採択した。

(2) 採択課題の構成

採択した10件の課題の構成は表2に示す通りである。中性子発生用線源6件（レーザー駆動方式2課題、加速器駆動方式3課題、慣性静電閉じ込め方式1課題）、中性子検出器・測定分析手法3件（検出器開発2課題、測定分析手法開発1課題）、中性子制御（ターゲット、モデレータ、冷中性子源開発）1件である。

表2 要素技術による採択課題の分類

要素技術	項番	研究代表者（所属 役職）	研究課題名
中性子発生用線源（加速器駆動、レーザー駆動他）	01	清水 裕彦（名古屋大学 大学院理学研究科 教授）	小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像
	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
	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
	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）	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
	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）	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
	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
中性子検出器、測定分析手法	03	瓜谷 章（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）	He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発

	05	高橋 浩之（東京大学 大学院工学系研究科 教授）	中性子フラットパネルディテクタの研究開発
	09	小泉 智（茨城大学 大学院理工学研究科 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
ターゲット、モデレータ、冷中性子源	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

6. アドバイザーの構成について

(1) 人選にあたっての考え方

本プログラムで委嘱したアドバイザーは表3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3 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

7. 技術テーマのマネジメントについて

(1) PO の運営方針

本プログラムの総合的な目標は、産業利用に活用される小型中性子源による検査・分析ツールの開発である。その実現のためには、中性子発生源からビーム輸送、中性子検出、測定データの解釈まで多岐に渡る要素項目を組み合わせて一体型システムとしての小型中性子源を開発する必要がある。そのため、一体型システムの各構成要素の開発を担当する10件の課題を採択した訳であるが、そのような本プログラムの特徴のため、各課題が担当する構成要素は必然的にシステムの一部に過ぎず、ややもすると最終全体目標への道筋を見失う危惧がある。

そこで、本プログラムのマネジメントの要点として、どの課題の実施担当者にもシステムとしての完成像を常にイメージに持つことと、そのための具体策として中性子ビームの検出や撮像試験を課題の一部として取り入れて実施していただく事を強く推奨した。このことにより、特に中性子発生源の課題や検出器開発課題の研究チームには、システムとしての最終的な利用をイメージし実感しつつ開発に取り組んでいただくことが出来たと考えている。

さらに、稼働している理化学研究所の小型中性子源施設 RANS の協力を仰ぎ、各課題には可能な限り実際に中性子ビームを用いて、開発要素の性能試験に臨んでいただく事を要請し、そのための共同研究や研究計画の立案の支援を行った。

(2) 技術テーマの進捗状況の把握

本プログラムは、平成27年度から5年間の予定で実施された。初年度の平成27年(2015年)度の8月26日から10月14日の期間で課題を公募した。その後、11月2日に書面審査、12月2日に面接審査を行って採択課題10件を決定し12月21日にプレスリリースが行なわれて、正式に開発研究プログラムが開始された。初年度内の翌平成28年2月17日には、第1回「産学共創の場」を本プログラムのキックオフミーティングと位置付けて開催し、各課題(技術テーマ)の研究開発計画を詳細に把握するとともに、産業界からの出席者から開発計画の方向性に関してご意見を頂いた。

その後は、毎年度開催した「産学共創の場」における研究発表と質疑応答、および年1回実施したサイトビジットにおける発表と現場視察により各課題の進捗状況の把握に努めた。なお、本プログラムで採択した課題の研究期間は、3ヶ年1件、4ヶ年3件、5ヶ年6件である。研究期間が3ヶ年の課題に対しては、平成28年度、29年度の2回のサイトビジットを実施し、内1課題については、研究期間終了後の平成30年4月に事後評価の最終確定のためのサイトビジットを行った。研究期間が4ヶ年の課題に対しては各3回、5ヶ年の課題に対しては各4回のサイトビジットを実施し開発研究の進捗状況を把握し、サイトビジットに同行したアドバイザーとともに研究計画に関する提言を積極的に行った。

(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要

産学共創の場およびサイトビジットにおける議論に基づいて、複数の課題で研究計画の見直し・変更が行われた。また、研究計画の変更に伴い、新たな研究協力者・施設が必要な場合にはPOの判断で共同研究を呼びかけ、追加の研究経費が必要な場合には予算状況の許す範囲内で増額変更を認めた。以下、計画変更の実際を箇条書きで記す。

・課題番号01の「小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像」では、陽子加速器本体の調整に時間を要し、開発計画の目標である第2ビームラインの建設・整備が大幅に遅れた。そのため、研究期間内で冷中性子源を実装することを断念し、冷中性子源の設計完了までを研究

計画とする計画変更を提案し、研究期間を1年短縮して終了することとした。

・課題番号 02 の「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」では、開発中の高速中性子用検出器の性能評価試験をレーザー中性子源の開発を待たずに実施していただいた。そのために、本プログラムの下で理化学研究所の小型中性子源施設 RANS において新たに高速中性子ビームを供給できるようにモデレータ部を改造していただき、当該検出器の撮像試験を実施し、研究計画の早期に開発中の高速中性子用検出器の性能評価を実現した。その結果、感度不足であることが判明したので、その対策として実に 10^5 倍の増幅率を発揮するアバランシェダイオードを応用した光増幅パネルの開発に成功し、その特許の申請に至るとともに、その検出器を用いて大規模レーザーにより発生された 1 ショットパルス中性子ビームによる撮像試験にも成功した。

また上記の共同研究グループである理研における高速中性子検出器の性能の評価試験においては、高速中性子供給のためのモデレータの改造費を追加配分した。

・課題番号 03 の「He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発」では、1 次元位置敏感型検出器の開発が目標であった。しかしながら位置分解能の向上が頭打ちであったため、開発中の LiCAF シンチレータを 0 次元検出器へ応用し、既存の 0 次元ヘリウム 3 ガス型検出器の性能を凌駕することを試みることを提案したところ、速やかに計画変更がなされた上に、2 次元検出器への適用と開発も意欲的に進められた。また、LiCAF シンチレータの機械的柔軟性を活かす円環型検出器の開発では、小型中性子源では難しいと考えられていた粉末試料の回折パターンの測定に挑戦していただく事を提案した。これは、当該検出器の柔軟性を応用してデバイシェーラー環を一挙に積分して測定できる特徴を回折パターンの測定に応用するもので有り、当該検出器のみが可能な測定手法である。そのために京都大学の小型中性子源 KUANS に新たに協力していただき、性能評価試験を実施したところ、鉄粉末試料の回折パターンの取得に成功した。

・課題番号(項番) 05 の「中性子フラットパネルディテクタ開発」においては、ボロンコンバータと電子増幅型ガスシンチレータの開発の優先度を下げること認め、ZnS シンチレータと大面積受光素子パネルの組合せによる中性子用大面積フラットパネル型検出器(nFPD)の開発を最優先させた。これにより完成度の高い nFPD を早期に実現し、理化学研究所の小型中性子源施設 RANS の協力の下、nFPD を用いた 3 次元 CT 画像の取得にも成功した。

大面積受光素子パネルへの計画変更に際しては、受光素子の試験製作費を検討の上、追加配分した。

・課題番号 07 の「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」では、慣性閉じ込め方式の小型中性子源ならではの利便性を実証することを念頭に、長時間運転の実証に取り組むことを提案した。これを受けて 5 時間安定運転、40 時間連続運転が成功裏に実施された。また、本方式により発生された中性子を用いて中性子イメージングを行い、発生中性子束(フラックス)の定量的評価を実施したことにより、本方式の超小型中性子源によるイメージング応用の可能性を実証した。

・課題番号 08 の「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」では、超小型加速器の開発が目標であるが、その実機による実証運転試験は本プログラム内の開発計画からは除外されていた。しかし、実証試験で必要とされる高周波電源の開発可能性を検討していただいたところ、当初の開発計画で提案していた加速器の運転周波数 650MHz では高周

波電源の開発実績が無く開発の目処が立っていないことが判明した。そこで、高周波電源として開発実績のある 500MHz へと運転周波数の設計値を変更することをアドバイスし、計画変更を承認した。本研究をベースに実証機設置への検討が進み、研究協力者の他機関での対応であるが、高周波電源の取得が可能となり、本プログラム終了後には実証試験が実施される見込みである。

・課題番号 09 の「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」では、当初計画の CCD カメラによるラジオグラフィとシリコン完全結晶の応用を取りやめた。その代替として、広角背面検出器を設置して非干渉性散乱の精度の良い測定や広角部の回折ピークの同時測定を可能にし、小型中性子源用小角散乱装置としての活用範囲を拡げることとした。また、ピンホールコリメータの改良を行い、小角散乱としての最小観測波数 $q_{\min} = 0.007 \text{ \AA}^{-1}$ を達成し特許出願を果たした。

（４）研究課題の評価と指導

産学共創の場および各サイトビジットの機会には、アドバイザーと PO が個々に研究課題を評価した。具体的には、本プログラムの技術テーマの特徴も考慮した上で、研究計画書に記された達成目標とチェックポイント（CP）に基づき、その技術的妥当性、研究期間内の進捗状況を見て、成果の創出状況、研究計画の変更・見直しの必要性の有無を判断した。サイトビジットの場合には、ビジット終了後のサイトビジットメモの取りまとめプロセスを活用して、アドバイザーと PO の意見交換・意見集約を行い、研究計画の変更・見直しについては統一見解を取りまとめて、文書（サイトビジットメモ）として研究代表者に伝えた。新たに共同研究者の紹介や施設の使用が必要な場合には、PO の責任で対応を行った。

なお、課題の中間評価会と事後評価会を下記の日程で実施した。

- ・平成 29 年（2017 年）11 月 13 日、20 日 中間評価会および 3 年終了課題の事後評価会
- ・平成 30 年（2018 年）12 月 10 日 4 年終了課題の事後評価会
- ・令和 2 年（2020 年）1 月 31 日 5 年終了課題の事後評価会

（５）課題中間評価における評価基準（研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠）

研究課題の評価は、JST により用意された評価方法指針と評価シートの項目に従って、全アドバイザーと PO が各課題に対して個々に評価し、それを持ち寄って全体会議で意見交換・意見集約を行い、統一評価を取りまとめた。具体的には、本プログラムの技術テーマの特徴も考慮した上で、研究計画書に記された達成目標と CP に基づき、その技術的妥当性、研究期間内の進捗状況を見て、研究計画の変更・見直しが必要か否かを判断した。

（６）研究費の配分

提案された研究計画に伴う研究費に関しては、提示された予算額の範囲内であったため、特別な変更は必要としなかった。しかし、産学共創の場・サイトビジットの提案による研究計画の変更に伴って発生する追加予算については、予算の許す範囲内で追加配分を検討し実施した。

（７）「産学共創の場」の推進と活用

本プログラム開始初年度の 2 月にキックオフミーティングとして開催した第 1 回から、最終年度の第 5 回まで毎年度開催した。各回のプログラムには特別講演の枠を設け、産業界の方々に本技術テーマに関連の深い話題を取り上げたご講演を行っていただいた。また、各研

究代表者のプレゼンテーションに対して提供された意見は、会議後に集約し、必要な見解を統一意見として取り纏め、計画変更や研究の加速化に資する意見として、研究代表者に提供した。

（８）アウトリーチ活動

本プログラム下における成果を紹介する一助として、課題番号 05「中性子フラットパネルディテクタ開発」と課題番号 08「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」の 2 件を、平成 30 年（2018 年）8 月 30-31 日に開催されたイノベーションジャパンに出展した。

また、本技術テーマに密接に関連する活動として、レーザー学会において「レーザー中性子源利用専門委員会」が 2017 年 4 月から 2 年間にわたり開催された。この委員会には、レーザー中性子源に関わる研究者のみならず、加速器方式・慣性静電閉じ込め方式等、他手法による中性子発生源の研究者、さらには中性子ビームを基礎研究や産業利用に利用している研究者も幅広く参加し、繰り返しレーザーによる中性子発生技術とその利用につき現状と課題が分析された。この委員会の活動報告はレーザー学会誌 2018 年 10 月、11 月号の 2 号にわたる特集記事として公表されている。

8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況

(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況（産業界で共通する技術的課題「技術テーマ」の解決に資する成果創出）

本プログラム全体としての達成目標は、小型中性子源による検査・分析ツールの一体型システムとしての完成に資する各必須要素技術の確立である。この目標を達成するために、本プログラムでは10件の個別課題を採択したので、個々の課題毎に設定されたそれぞれに異なる最終目標に対する開発の進捗度により個々の課題の最終評価結果は大きく異なった。S評価の3件では大きく目標を上回る開発成果が上げられた。A評価の4件は着実に研究が進められ手堅く開発目標を達成した。B評価の3件には、それぞれ事情があり開発研究に目覚ましい進展は認められなかった。特に、提案した研究期間が短すぎた1件に関しては、本プログラムの下で開発研究が継続されていればAないしS評価となっていた可能性が認められ、工学的課題の解決に際して時間不足であったことは誠に遺憾である。

(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果（特に、技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等）

小型中性子源による検査・分析ツールの一体型システムとして完成する上で貢献が期待される多数の開発実績が、本プログラムの下で得られた。表4には、貢献が期待される技術のブレークスルーとなる要素項目を、課題毎に箇条書きで記す。なお、箇条書きにした各項目は今後の研究開発の方向性と密接に関係しているため、本章の(4)「技術成果を産業化に繋げるための方策・課題」の節で「今後の方向性」として取りまとめている。個別の内容は、そちらを参照していただきたい。

表4 技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等

要素技術	項番	研究代表者（所属 役職）	研究課題名	技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等
中性子発生用線源（加速器駆動、レーザー駆動他）	01	清水 裕彦（名古屋大学 大学院理学研究科 教授）	小型定常中性子源を用いた中性子透過撮像	・BNCTと共存可能な第2ビームラインの建設
	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	・レーザー駆動小型中性子源専用レーザーの仕様決定 ・高速中性子用高感度検出器の開発 ・3種の中性子発生手法毎の発生中性子量の大幅な記録更新
	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	・陽子電流 1.4mA レベルの長時間安定運転の成功 ・検出器、遮蔽大会初への中性子ビームの提供開始
	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	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	・当該方式で発生させた中性子による撮像の成功

		研究所 准教授)		
	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)	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	・可搬型中性子源用超小型加速器の開発
	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	・新しいテープ式ピッチャー機構の提案
中性子検出器、測定分析手法	03	瓜谷 章 (名古屋大学 大学院工学研究科 教授)	He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発	・円環型検出器の試作
	05	高橋 浩之 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)	中性子フラットパネルディテクタの研究開発	・製品レベルの nFPD の開発 ・小型中性子源における 3 次元 CT の実証
	09	小泉 智 (茨城大学 大学院理工学研究科 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	・低ノイズの小型中性子源専用小角散乱装置の開発 ・マルチピンホールコリメータの開発
ターゲット、モデレータ、冷中性子源	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	・低放射化、高耐久性ターゲットの開発 ・小型中性子源用冷中性子源の開発

(3) 個別の産学共同研究への発展状況

・課題番号 03 の「He-3 代替位置敏感型中性子検出器の開発」では、TRUST LiCAF と命名されている機械的に柔軟な特徴を有する新規シンチレータ素材の中性子用検出器としての適用が開発課題であるが、当初より当該素材メーカーとの密接な協力関係が構築されている。

・課題番号 04 の「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」では、本プログラム期間内に行った加速器各部の改良により、加速器の性能が安定し陽子電流 1.4mA レベルでの長時間安定運転を実施できるようになった。この実績により、中性子ビームを供給できるようになったため、遮蔽体・検出器などの分野の開発が共同研究として関連企業と実施できるようになった。また、本プログラムの他の検出器開発課題との共同研究も進行中である。

・課題番号 05 の「中性子フラットパネルディテクタの研究開発」では、フラットパネル用の大面積受光素子の開発メーカーとの共同研究が進行中である。

・課題番号 06 の「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」では、小型中性子源の心臓部を構成する要素技術を開発したが、その成果を国産化するためにあえて特許の申請を行わず、製品の製造ノウハウを国内協力企業に指導・提供している。国際競争力のある知財の創出と権利確保の方向性として、高く評価できる戦略判断である。

・課題番号 07 の「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」では、本プログラム下における開発研究の進捗の結果、小型中性子源として高出力化するためには、様々な工学的課題の解決がさらに必要であることが明らかになった。そこで、慣性閉じ込め方式による小型中性子源の商品化を目指す高性能化に向けて、当初より課題の共同研究者として参加していた機器メーカーとの共同研究が進行している。

（４）技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等

本プログラムにおける「産業化」とは、小型中性子源が検査・分析ツールとして社会に認知され普及していくことである。小型中性子源が検査・分析ツールとして産業界および大学や公設試を含む研究機関に普及することにより、小型中性子源の販売市場が形成される。その結果、小型中性子源を「自己完結する検査・分析システム一式」として販売する総合メーカーや小型中性子源の各構成要素を製造する機器メーカーに取っての販売市場が確立したこととなり「産業化」が現実のものとなる。しかしながら、社会に普及する検査・分析ツールとして小型中性子源が技術的に確立するためには、個々の要素技術ごとにその開発段階が大きく異なるため、それぞれの要素技術の現状に合わせたきめ細かな開発支援策を継続することが必要である。

また「産業化」の別側面として、中性子ビームの検査・分析性能が理解され広く知られるようになり、検査・分析ツールとしての小型中性子源の有用性が社会に認知されなくてはならない。しかし、中性子ビームの利用機会が限られているため、中性子ビームの有用性はなかなか社会に浸透せず、その認知度は非常に限定的である。従って、小型中性子源の技術テーマとしての確立の道程には、産業・研究現場における分析ツールとしての魅力的な利用例の創出や、そのアウトリーチ活動を伴うことが、システム開発に並行して必須である。

このことから ASTEP のステージⅠを終了した各課題が直ちに企業とタイアップしてマッチングファンドを獲得し共同開発ステージへと進むことは、本技術テーマの開発段階としては時期尚早と言わざるを得ない。そこで、各課題の開発段階に適合し最も相応しいと考えられる方策の方向性を下記に、そのカテゴリー毎に取りまとめておく。

【中性子発生用線源】

・レーザー駆動方式

本プログラム下の活動により、レーザー駆動方式用のレーザーの仕様が見極められた。次の段階は、その仕様を満たす小型中性子源専用レーザーの開発である。また、レーザー駆動方式の中性子発生部のターゲットとモデレータである「ピッチャー・キャッチャー」におけるテープ式ピッチャー方式は有力な課題解決方式と思われる。その工学的な課題の解決に注力し、小型中性子源システムとしての完成へ貢献していただきたい。

・慣性静電閉じ込め方式

中性子束（フラックス）を更に引き上げるためには、発熱・冷却・遮蔽等の解決すべき工学的課題が多数残されている。小型中性子源として簡便かつ安定的に適度な中性子束を供給できるシステムとしての完成を開発の最終目標とし、システムとしての完成を急ぐべきである。

・加速器駆動方式

据え置き型に関しては、既に技術的には一定レベルに到達しており、中性子ビーム供給施設として定常的な利用運転が出来る状況を実現することが現段階で最も望まれる施策の方向性である。一方、可搬型に関しては、実証機による試験運転とその活用例の創出が望まれる。

【検出器・測定分析手法】

・検出器

完成度の高い nFPD に関しては、共同研究者によりベンチャー企業が設立されており、今後、その普及に期待する。

TRUST LiCAF に関しては、小型中性子源専用粉末回折測定装置に特化した分光器システムの開発が進むことを期待する。

・測定分析手法

本プログラムの下で、小型中性子源用小角散乱装置のひな形として一定の完成を見た。今後は、細部の高度化により一層測定装置としての性能を向上させるとともに、産業利用を念頭に魅力的な測定例の創出をさらに進めるために、研究組合方式による利用普及活動を進めることを期待する。

【ターゲット・モデレータ・冷中性子源】

普及型に要求される低放射化、簡便な操作性等を十分達成している。建設されるすべての小型中性子源に必要な構成要素で有り、機器メーカーへの技術移転により商品化されることを期待する。

（５）今後のプログラム運営への提言

今回の A-STEP 産業ニーズのプログラムの設定に関して、5 年間という研究期間は概ね妥当であり、予算額も総額としては妥当であった。しかし、本技術テーマの特殊性として 10 件の開発課題を採択したため、個々の課題に関しては、さらに予算が必要とされる課題も無きにしも非ずであった。そこで、プログラムの初期には、個々の課題の個別事情を精査して可能な限り追加予算を配分して開発研究を加速させることに努めた。そのため 5 年間と言う研究期間内で、かつ各課題に配算された予算額の制約下ではあるものの、個々の要素技術の開発に関しては多数の成果が創出されたと言える。従って、今回の技術テーマの経験を踏まえると、さらに大型の予算を必要とする研究開発であっても、その採択課題数が数件であれば、本プログラムの枠組みの下でも、予算を重点配分することにより十分な研究開発費を設定し研究を実施できるものとする。

さらに本技術テーマの特殊性として、中性子発生源を開発した後には、その発生源を用いて中性子ビームを発生し測定・分析ツールとして利用されることが重要であり、そのためには中性子発生源を運営する施設が設立され、継続的に利用運転される必要がある。しかしながら、そのような利用施設の設立や運営は本技術テーマの設定には馴染まない。本技術テーマのように共同利用施設の運営が産業化への通り道となる技術テーマに関しては、そのような活動を支援できるスコープが望まれる。

9. 総合所見

本プログラムの研究マネジメントにおいては、アドバイザーの指摘やコメントを参考にしつつ、個々の課題の達成目標に対して開発研究がより加速するように様々なアドバイスを行った。日程に遅れの出ている課題に対しては、課題の中で遅れた部分の成果を必要としない開発研究を優先するように指導した。複合課題のいくつかに対しては、本プログラム内の他の課題の研究資源を活用することにより大幅に研究を加速できるものがあったため、それらの課題に関しては、サブ課題を進捗させる共同研究のアレンジや協力関係を構築する支援を行った。サブ課題を含めた多数の課題間で、有機的な研究協力が実りを結んだと判断している。さらに、「産学共創の場」における意見交換が各課題の個別の達成目標を包摂して、本技術テーマで掲げられた「産業利用に供される中性子ビームによる検査・分析ツールの完成」という出口イメージを強く認識し共有する格好の契機となった。

技術テーマ全体としては、本プログラムの下で測定システムの上流から下流までのそれぞれの段階を構成する要素技術のすべてに大きな進展が見られた。例えば、レーザー駆動方式中性子源に関しては、レーザー光の 1 ショットから軽元素核反応方式により中性子パルスの生成に成功したことと、高速中性子用検出器の超高感度化の成功と相まって、一ショットで生成された中性子パルスによるラジオグラフィ撮像にも成功し、一躍、この分野で世界をリードする研究が達成された。

本技術テーマが設定され、A-STEP プログラムとして 5 年間活動したことにより、レーザー駆動方式中性子源の開発は、夢物語から現実的な開発段階へと脱皮した。一方、加速器駆動方式小型中性子源に関しては、複数の施設が準稼働状態を迎えており、今後は事前に一年間の運転予定を決定して安定した利用運転を行うと言う、これまで JRR-3 や J-PARC のような大型中性子施設でしか行えなかった施設運用が可能となりつつある。複数の小型中性子源施設で、中性子ビームを利用者に継続的に供給できる時代が現実のものと成りつつあるのである。

本技術テーマが産業力強化に資するためには、確立された各要素技術を統合し、「完成された検査・分析システム」を世に送り出すことである。その前段階として、小型中性子源の需要を推定することが必要であり、そのためには多数の国立研究法人や公設試などの研究機関に小型中性子源が導入され、どのような産業分野のどのような素材開発に小型中性子源が有用であることを示す活用事例が蓄積され、広く社会に知られることが必要である。本プログラムによる需要喚起に繋がる活用事例としては、小型中性子源で中性子 3 次元 CT に成功したこと、小型中性子源を用いて高分子材料の小角散乱測定が可能であることを実証したことなどの成果をあげることができる。現在、そして今後 1~2 年の間に稼働中となる小型中性子源施設において、産業利用への活用事例の創出が継続的に行われて、始めて今後の小型中性子源の社会的普及への道が拓けることになるであろう。