

生態系インフラストラクチャーによる持続可能社会の構築

① 計画の概要

本研究は、2014 年 9 月に日本学術会議から提言された生態系インフラストラクチャー（以下 EI）の多様な機能を明らかにし、社会における EI の活用の合意形成や実装を通して、持続可能社会の構築を目的としている。極めて学際性の高いこのテーマにおいて、分野を越えた新たな統合的学術領域の確立を目指す。すなわち、EI は水や食糧の供給サービスを有し、私たちの生活の基盤となるばかりでなく、健康で文化的な生活を支えたり、災害を防いだり、ほとんどすべての人間の生活に大きな関わりを持っている。よって、あらゆる学問領域を駆使する統合的アプローチが求められる。さらに、地球上のすべての国と地域においても同様の課題が存在するが、その背景となる自然・社会環境は大きく異なる。それぞれの場所で自然と人間の歴史を踏まえて、未来の持続可能社会を構築する方法を明らかにするため、EI の環境情報基盤の構築も行う。

EI は日本にとって極めて新しい概念であるが、豊かな自然に恵まれ、自然災害の多い国土において古くから歴史的 EI と言える事例が数多く蓄積されてきた。歴史的 EI を再評価することは今後の日本の人口減少時代の持続可能社会の構築に大きく貢献するとともに、アジアを中心とした発展途上国の EI 導入を促すものとなる。

② 目的と実施内容

自然資本と生態系サービスを賢く活用し、持続可能社会を生み出す方法として、近年グリーンインフラストラクチャー（以下 GI）が注目されるようになってきた。2014 年 9 月に出された日本学術会議提言「復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ」では、GI が多義に使われていることを鑑み、GI から人工的な緑地/水域などによるインフラを除き、生態系を活かすもののみと指す用語として生態系インフラストラクチャー（以下 EI）を使うことを提案しており、本研究でも EI の用語を用いる。

本研究は、EI の多様な機能を明らかにし、社会における EI の合意形成や実装を通して、持続可能社会の構築を目的としている。極めて学際性の高いこのテーマにおいて、分野を越えた新たな統合的学術領域の確立を目指す。EI は水や食糧の供給サービスを有し、私たちの生活の基盤となるばかりでなく、健康で文化的な生活を支えたり、災害を防いだり、ほとんどすべての人間の生活に大きな関わりを持っている。よって、分野横断というような研究ではなく、あらゆる学問領域を駆使する統合的アプローチが求められる。さらに、地球上のすべての国と地域においても同様の課題が存在するが、その背景となる自然・社会環境は大きく異なる。それぞれの場所で自然と人間の歴史を踏まえて、未来の持続可能社会を構築する方法を明らかにするため、EI の環境情報基盤の構築も行う。2017 年度から 2022 年度までの 6 年間にわたり、EI を評価する手法を明らかにし、アジアの EI の賦存状況を地図化することを目標とする。

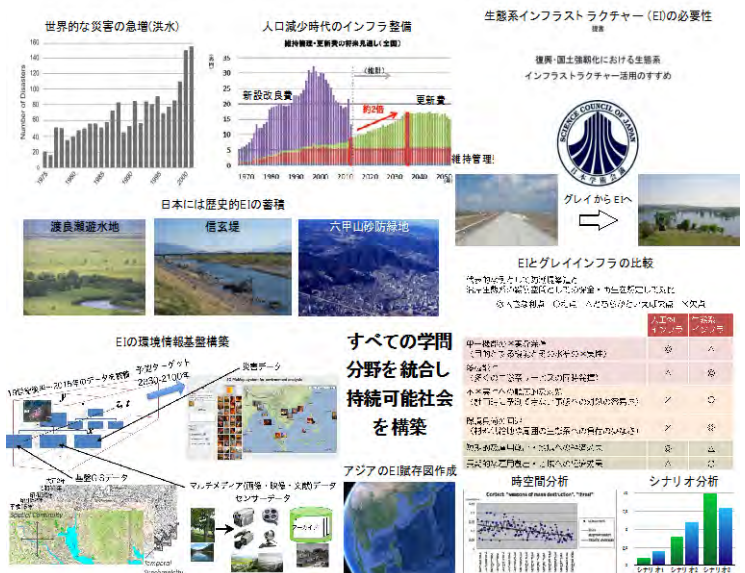
③ 学術的な意義

GI や生態系の防災的な側面に着目した Eco-DRR (Ecosystem-base Disaster Risk Reduction) は近年急速に注目され、発展途上国においても導入の検討が進んでいる。しかし、先に述べたように GI の定義は多岐にわたり、Eco-DRR についても生態系を基盤とすると言いながら、防災・減災と自然環境・生物多様性の保全をどのように両立させるのか、その手法はほとんど明らかになっていない。グレイインフラはそのコストとベネフィットを評価する方法が概ね確立されているが、GI、Eco-DRR、EI では、未だ一部の機能でしか評価方法が明らかになっていない。加えて、多くの研究と応用が欧米を中心になされているが、異なる自然・社会環境においても適用できる汎用性のある方法の確立が急務である。

日本は豊かな自然に恵まれ、自然災害の多い国土において古くから歴史的 EI と言える事例が数多く蓄積されてきた。近代以前も甲府盆地の信玄堤や遠州灘の命山、中部地方に見られる輪中などは歴史的 EI と言えるであろうし、近代に入ってから六甲山の砂防緑化や渡良瀬遊水地などが挙げられる。このような歴史的 EI を再評価することは今後の日本の人口減少時代の持続可能社会の構築に大きく貢献するとともに、アジアを中心とした発展途上国の EI 導入を促すものとなる。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

日本国内については、EI に関わる研究は、まだ始まったばかりの段階と言えるだろう。本研究提案に関わるメンバーは、先に述べたように 2014 年 9 月に発表された日本学術会議の提言をとりまとめ、現在は環境省の環境研究総合推進費「ハビタットロスの過程に着目した生態系減災機能評価と包括的便益評価手法の開発」（研究代表者一ノ瀬友博）と総合地球環境研究所フィ



ージビリティスタディ「人口減少時代における気候変動適応としての生態系を活用した防災減災（Eco-DRR）の評価と社会実装」（研究代表者吉田丈人）を進めており、国内の関連研究で中心的な役割を果たしている。

国際的に注目すべき動向としては、ドイツ政府（研究教育省）が2012年より進めている研究プロジェクト「日本とドイツのさとやま環境の持続的利用に向けてー農村環境管理の統合的理念としての生物多様性と生態系サービス（略称 JAGUAR）」があり、日本の研究者との密接な共同を求めている。本研究はこのプロジェクトをはじめ、欧米やアジアにおける関連のプロジェクトと連携し、EI 研究の国際フォーラムの構築をめざす。

⑤ 実施機関と実施体制

実施期間 2017～2022 年

実行組織 総合地球環境研究所、慶應義塾大学、東京大学、中央大学

主な実施期間を2017年～2022年とするのは、この計画が構想段階にあるため、研究組織に1年を要することと、東日本大震災から10年の2021年を経て、EIを基盤とした持続可能社会のあり方を明らかにするためである。総合地球環境研究所は、人文学、社会科学、自然科学の広範な分野の研究者、とくに若手研究者が所属し、研究および人材養成の役割を幅広く担う。既に先に述べたフィージビリティスタディを東京大学と連携して開始しており、本研究の中核的な研究組織として位置づけられる。慶應義塾大学環境情報学部は、設置されて25年を経ているが、常に日本のインターネット技術を牽引してきており、近年はIoTの先端研究機関である。環境分野におけるIoTの活用にも取り組んでおり、先に挙げた環境研究総合推進費の研究が推進されている。本研究の環境情報基盤構築を担う研究組織となる。東京大学は先の総合地球環境学研究所と連携して、フィージビリティスタディを進めており、本研究におけるあらゆる学問領域の統合的アプローチを支える役割を果たす。

⑥ 所要経費

6年間の研究のおよそ50億円程度の所要経費の内訳を下に示す。研究の進展状況により、変化が予想されるが、平均的な額を示した。人件費の占める割合が大きいことは、既存の分野からEI研究領域に優秀な人材をリクルートして強力な研究実行チームを構成するためである。また、国内外の多くの現場における実践に参加しながら研究を進めるために旅費の占める割合も大きくなっている。国際的シンポジウム、国内シンポジウム・フォーラム、現場でのワークショップなど、研究者以外の主体も含めた多くの会議の開催のための会議費、自然史データ、衛星・空中写真データ、社会経済的データなどの収集、ネットワーク構築・維持・活用にも相応の経費を割く必要がある。人件費：3億円／年×6年＝18億円（特任教授、ポスドク研究員、技術補佐員等）、旅費：1億5千万円／年×6年＝9億円（国内外フィールド、会議等）、会議費：5千万円／年×6年＝3億円（シンポジウム等）、消耗品費：1億5千万円×6年＝9億円、印刷費・労務費・データベース管理費：5千万円／年×6年＝3億円、地理情報システム・情報ネットワーク費：1億5千万円／年×6年＝9億円

⑦ 年次計画

2017 年 ●研究組織の構築と統合的な研究としてプロジェクトを実施するための情報共有のためのシンポジウム・フォーラムを複数回開催 ●東日本大震災被災地の研究サイト、福井県三方五湖自然再生事業地、奄美群島などの研究サイトにおける地域との協働による地域研究プロジェクトの組織するためのワークショップの開催（数回） ●各種国際的な共同研究のためのシンポジウムや海外の現場でのワークショップを開催 ●データなどの収集や電子化されていない情報の電子化など、資料収集と整理、データベース化の方針を決めてデータ収集を開始

2018 年～2021 年 ●上記多様なデータの収集を地域の現場における参与型の研究とあわせて行い、データセットが利用できるようになった対象から順次関係性の分析・評価、モデル化。現場での実践の計画に反映して検証。とくに、空間生態学的な分析を重視 ●毎年1回ずつ情報共有のためのシンポジウム、フォーラム、EI と Eco-DRR に関するワークショップを開催 ●EI 国際的ワークショップを開催

2021 年～2022 年 ○研究成果をとりまとめて、各フィールド地域における EI を維持・発展させるための指針や管理戦略やアクションプランを地域の多様な主体が参加するフォーラムによって策定○EI を活用した防災・減災についての手引き書を作成 ●個別の研究の学術誌における発表に加え、地域や国の気候変動適応策や政策に研究成果を反映させるための文書を作成してインターネットで公表 ●EI の新しい戦略計画等の計画に研究成果を反映させるための英文文書を作成してインターネットで公表

⑧ 社会的価値

日本は、21 世紀初頭から人口減少時代に入りました。人口減少と高齢化のスピードは近代においてどの国も経験したことがないもので、2100 年には人口が3千万人台になることも予想されている。その過程では新たにインフラを建設するどころか、既存のインフラの維持管理すらままならなくなる可能性がある。つまり、日本にとっては欧米の先進的な取り組みがどうであろうか、EI を活用しなければならない状況になっている。加えて、気候変動による様々な影響が予測されているため、社会のレジリエンスが求められている。よって、本研究は日本にとって今まさに取り組むべきものであり、研究の遅れは社会にとって大きな損失となる。加えて、韓国や中国をはじめ、多くの国々が同様に高齢化、人口減少社会を迎えることが予想されていることに加え、アジアの国々は日本同様に数々の自然災害に見舞われている。日本における先進的な研究と取り組みは、アジア諸国における対策を牽引する役割を持つ。

⑨ 本計画に関する連絡先

一ノ瀬 友博（慶應義塾大学環境情報学部）

Future Earth：地球人間圏の相互作用環の俯瞰解明に基づく地域からグローバルな持続可能性の追求

① 計画の概要

本研究計画は、地球環境変化研究と持続可能性研究を学際・超学際研究として統合的に行う計画である。(日本学術会議提言「持続可能な地球社会の実現をめざして—Future Earth (フューチャー・アース) の推進—」(2016年4月)参照)。本計画は、地域からグローバルまでの「持続可能な未来地球社会」を構築するために必要不可欠な1) 自然と社会の統合システム知、2) 未来社会の設計知、3) よりよい社会への変革知を構築するために、それらの知を集積し、統合的な研究を行う。実施には、自然科学・社会科学・人文科学の幅広い分野の研究者による学際研究だけではなく、研究者コミュニティと行政など社会の関係者が企画から社会実装までを通して共に研究する「超学際研究」を実践することで、「科学のための科学」から、「社会と共にある科学」へのパラダイムシフトを視野にいたした新しい研究スタイルを確立する。特にアジア地域で喫緊に必要な5つの優先的研究課題(図1)に取り組み、その過程で、自然と社会の相互作用を統合的に理解し、持続可能な未来社会を形成するための知として構築し、さらに行動様式や新しい制度など社会の変革につなげる統合知を得る(図2)。これらの研究と実践を通して、社会的価値が大きく、自然・社会の統合的な見方に対する国民の理解が促進される。

② 目的と実施内容

本計画では、地域からグローバルまでの「持続可能な未来地球社会」を構築するために必要不可欠な1) 自然と社会の統合システム知、2) 未来社会の設計知、3) よりよい社会への変革知を構築し、さらにそれらの知の統合研究を行う。この統合研究は、日本学術会議が2016年4月に発表した提言「持続可能な地球社会の実現をめざして—Future Earth (フューチャー・アース) の推進—」に、国際的に推進すべき研究課題として示された以下の5課題、即ち、(1)長期的視野に立った地球環境の持続性を支える技術・制度の策定、(2)持続可能なアジアの都市および生活圏の構築と土地利用の策定、(3)エネルギー・水・食料連環(ネクサス)問題の同時的解決、(4)生態系サービスの保全と人類の生存基盤の確保、(5)多発・集中する自然災害への対応と減災社会を見据えた世界ビジョンの策定、を柱にして、それぞれに研究拠点を置いて展開する。これら5つの課題を担う研究拠点と3つの知を形成するセンターは連携して知の統合研究を行う。

③ 学術的な意義

これまで国際的な地球環境変動研究の4つのプログラム(WCRP, IGBP, DIVERSITAS, IHDP)や持続可能な開発に向けた政策科学研究は、我が国においても個別的にはそれぞれの成果を上げてきたが、それらの知を、地球環境問題の解決と持続可能な社会の構築に向けて統合的に進められるには至っていなかった。本計画では、これらの問題に対して、自然科学、人文・社会科学にまたがる学際研究を通して、自然と社会を統合的に理解して、持続可能な未来社会を形成するための知として構築すること、行動様式や新しい制度など社会の変革につなげる統合知を得ることで、数多くの学術分野と社会実装にまたがる成果を得ることが期待される。特に、具体的な地球環境問題の解決を、単なる技術的解決ではなく、地球社会のあり方につなげて、自然科学から人文・社会科学の学際的融合と社会との協働による超学際的研究を進めることは、これまでの「科学のための科学」としての近代科学から「社会のための(社会における)科学」への転換を促すという非常に大きな効果が期待される。

具体的にはFuture Earthのいくつかのコアプロジェクト(GLP, iLEAPS, IGAC等)や国際的なデータ・情報統合システムなどを学際的に連携して進め、自然と社会の統合システム知を構築する。特に、地球環境問題の重要なホットスポット地域であるアジアでの喫緊に解決すべき5つの重要課題について、研究のデザインから実装まで社会との協働を国際的な研究ネットワーク拠点の構築を通して行うことで、複合的な地球環境問題の具体的な解決に資する学術的貢献が大きいと期待される。また、国連の持続可能な開発目標(SDGs)など未来社会の設計知の形成に具体的に寄与できる新しい学術分野の発展が期待される。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

国際的なFuture Earth計画では、地球環境問題の解決と持続可能社会の構築に向けて進めるべき具体的な研究課題の抽出作業を行い、2014年に戦略的研究課題(SRA2014)として62課題を抽出した。また、国内では、代表申請機関の総合地球環境学研究所が中心となり、日本の戦略的研究課題の抽出と超学際研究・日本の強みに関する評価軸の設定が行われているが、本計画はこれらの国内外の動向を踏まえたものとなっている。

⑤ 実施機関と実施体制

国内の大学・研究機関および政府の実務機関などを含むネットワーク型の研究組織で推進する。ネットワーク全体の管理と運営は中核機関グループの連携により機能させる。またネットワークには5つの課題に対応した研究拠点を位置付ける。研究者全体の連携は、日本学術会議Future Earth推進委員会および関連委員会・分科会が担う。

●中核機関グループ：

人間文化研究機構総合地球環境学研究所；東京大学国際高等研究所サステナビリティ学連携研究機構；科学技術振興機構社会技術研究開発センター；国立環境学研究所；京都大学Future Earth Unit

●ネットワークサブ拠点：

北海道教育大学、北海道大学、東北大学、宮城教育大学、茨城大、筑波大学、気象研究所、産業技術総合研究所、千葉大学環境リモートセンシング研究センター、東京大学大気海洋研究所、東京大学生産技術研究所、東大工学系研究科、一橋大学、慶応大

学、情報通信研究機構、首都大学東京、東京学芸大学、政策研究大学院大学、日本科学未来館、海洋研究開発機構、地球環境戦略研究機関、名古屋大学、三重大学、国立民族学博物館、大阪大学コミュニケーションデザイン・センター、広島大学、高知工科大学フューチャー・デザイン研究センター、九州大学決断科学センター、国連大学

⑥ 所要経費

総額 118 億円。

内訳：(1) 中核機関グループ 5 機関にまたがる形で 3 つのセンター「自然・社会統合システム」「未来社会設計」「社会変革」の機能をするための施設等基盤設備費用（各機関 1 億円×5 機関=5 億円）と、その運営にかかる人件費と設備維持費（各機関 5000 万円/年×5 機関×9 年=22.5 億円）。 各中核機関とネットワークサブ拠点の間の打ち合わせ等にかかる旅費（5000 万円/年×9 年=4.5 億円） 計 32 億円

(2) ネットワークサブ拠点を中心に 5 つの課題の各課題に対して、情報収集と分析に必要な機器（計算機、ソフトウェア、データ、ネットワーク、化学分析装置など）の基盤設備費用と消耗品（各課題 1 億円×5 課題=5 億円）と、課題実施にかかる人件費（各課題 1 億円/年×5 課題×9 年=45 億円）、設備維持及び消耗品費（各課題 5000 万円/年×5 課題×9 年=22.5 億円）、旅費（各課題 3000 万円/年×5 課題×9 年=13.5 億円） 計 86 億円

⑦ 年次計画

国際プログラム Future Earth（～2025）の期間での計画を想定している。

2017 年度： 中核機関による 5 課題担当機関の調整・予備研究

5 つの中核機関を横断する形で機能するネットワークを設計。ネットワークサブ拠点と中核機関、フューチャー・アース現行コアプロジェクトの協議から、課題(1)～(5)の具体的研究計画立案と、ネットワークサブ拠点の分担実施体制、9 年間の研究計画を決定。各課題は、具体的な対象地域と当該問題の社会関係者の特定などの予備研究を行う。

2018 年度～2025 年度： 本格実施

中核機関は、課題実施に必要な関連情報の利用環境を整備し、5 課題の実施を促進。課題の実施に必要な気候観測・予測データ、各種統計データなどについては ICSU-WDS や DIAS など既存の国際的なデータ・情報統合システムデータベースを中心に取得、課題(3)(4)に不可欠となる生態系機能とその分布の時空間変動に関する情報は、生態系観測ネットワークとの協力から獲得できる連携基盤を構築する。ネットワークサブ拠点が中心となり 5 課題の解決にむけ実施する研究から得られる知見と知と実践のネットワークは、すべて中核機関に集約し、自然と社会の統合システム知の構築と、これに基づく地球環境問題の俯瞰的理解と、問題の全体に対して社会の変革で対応する方法と考え方を社会に対して提供する。

⑧ 社会的価値

Future Earth は地球が「生存の限界」に近づきつつある状況を見据え地球人間圏の持続可能性を追求する計画であり、その成否は人類社会にとって死活的に重要な意味を持つ。自然科学と人文社会科学の協働と、社会の多様な主体との協働による超学際研究を根幹に据える本計画は、これまでの「縦割り」の「科学のための科学」的な知的営みを乗り越え、「社会の中の科学」を基本とした新しい知の生産をめざすものである。特に、経済発展と環境保全の同時的な問題解決により、持続可能な社会の形成を目指すことで、経済・産業的価値と同時に、地球環境問題の解決を通じた社会的価値がある。また、環境問題の解決に個別に対応するのではなく、持続可能な社会の構築に向けて、分野・世代・地域を横断し、総合的・統合的に問題の理解と解決方法を構築するという考え方自体に対する国民の理解が進む。さらに、持続可能な社会にとって必要な、自然と社会のダイナミクスを統合的に理解するシステムとしての知や、未来の社会像や社会の目標を形成するための知、行動様式や新しい制度など社会の変容につながる変革の知等を得ることで、新しい知的価値が生まれる。本研究から導かれる地球環境問題に対して社会変革による対応策とその考え方を Future Earth に向け発信し、日本の地球環境学から国際社会への貢献とする。

⑨ 本計画に関する連絡先

安成 哲三（大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所 所長）



図1 課題群連環（コア・リンケージ）



図2 持続可能なアジアへ向けた統合研究システム

数理科学の深化と諸科学・産業との連携基盤構築

① 計画の概要

数学・数理科学は第5期科学技術基本計画において、未来の産業創造と社会変革のための共通基盤を支える横断的な科学技術と位置づけられ、各技術との連携強化や人材育成の強化に留意しつつ、その振興を図ることとされている。本計画では数学・数理科学を深化させるとともに諸科学・産業との連携を着実に展開するために、数理科学の研究機関が連携したネットワーク型の研究拠点を形成する。数学・数理科学のフロンティア探索とともに数学へのニーズの発掘からイノベーションへつなげるため、既存の各種プログラムの大幅な機能強化と新しい取り組みを開始する。

更に、この研究拠点において国際的研究動向を把握しフロンティアを形成するハブとなる訪問滞在型研究プログラムを実施する。日本の優位性を活かし長期的な発展を確保しつつ新分野開拓の先頭を走るためにも、長期訪問滞在型研究施設の設置は欠かせない。国外との連携事業などを積極的に推進することにより、数学・数理科学の世界動向を先導しフロンティアを拓く。

② 目的と実施内容

オールジャパンおよびオールコミュニティ体制の数学・数理科学の研究機関が有機的に連携したネットワーク型研究拠点を形成する。数学へのニーズの発掘からイノベーションへつなげるため、未来の産業や社会価値の創造につながる研究プロジェクトを立ち上げ、数学・数理科学のフロンティア形成や、諸科学・産業と連携して問題解決に取り組む。

- ・数学・数理科学のフロンティアと多様性拡大のための短期共同プログラム（公募型）
- ・諸科学・産業連携のための短期協働プログラム（公募型）
- ・テーマ集中プログラム（国際公募型、企業連携型）
- ・スタディグループ
- ・人材育成プログラム

③ 学術的な意義

数学・数理科学は長い歴史と豊かな広がりをもつ学問であり、人類の出会い様々な課題を数学的概念として定式化し解析する。その成果の汎用性は高く、自然界の法則の理解だけではなく、生命現象、新機能素材、環境問題、エネルギー、食料・水問題などの学際的研究や社会的問題解決のための研究で応用されており、人類社会の発展に大きく貢献してきた。これまで、とすればバラバラであった「知」を統合するため、汎化機能を特徴とする数学・数理科学の深化と展開（諸分野・産業との連携）の拠点となる研究基盤が必要である。

諸科学・産業界において数理的な問題解決を必要とする場が、近年特に増大している。その背景として、現代社会の情報化・複雑化、計測技術の進歩、計算機性能の向上などとともに、学術分野において異分野融合的な研究領域が重要になってきたことがある。異分野融合は自発的に起こる場合は希で、多くの場合、分野横断的な学問、特に数学・数理科学が分野をつなぐ大きな役割を果たしている。本計画により、数学・数理科学にもとづく、分野を横断・統合する手段を確立することで、従来の発想を覆すような異分野の融合と、それによるイノベーションの惹起プロセスを加速できる。同時に、その手段を習得した新しいタイプの研究者の育成により、学術分野の新陳代謝が連続的に起こり、結果として学術全体の活性化が期待できる。複雑でダイナミックな現象を捨象した抽象的思考を柔軟に行い、その結果をまた現実世界に投影できる研究者の育成は、アカデミアの誕生以来、アカデミアに身を置く人間の永続的な使命である。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

米国においてはNSFが2004年からPriority Areaの一つとして数理科学を推進し、大規模データへの数学的・統計的挑戦、不確実性のモデリングと管理、複雑非線形系のモデリングの問題を取り上げ重点的に予算措置してきた。米国・イギリス・ドイツをはじめ中国・韓国などアジア先進国においても、この20年、訪問滞在型研究所が次々と設立されている。一方、日本では、平成18年に文科省レポート「忘れられた科学—数学」が出されて以来、数学イノベーション委員会を開催し、数学・数理科学の振興施策を検討し、報告書がまとめられたところである。数学・数理科学と諸科学・産業との協働による研究推進の気運がようやく高まっているが、個々の取り組みは見えにくく、諸科学・産業界のニーズに応えるような組織的な活動には至っていない。このように、我が国における数学・数理科学の持続的発展と、その諸科学・産業との協働を促進する体制はいまだ不十分と言わざるを得ず、本計画で目指す研究拠点作りが望まれている。

⑤ 実施機関と実施体制

ネットワーク型研究拠点には、北海道大学社会創造数学研究センター、東北大学大学院理学研究科、東京大学大学院数理科学研究科、明治大学先端数理科学インスティテュート（共同利用・共同研究拠点）、統計数理研究所（大学共同利用機関）、早稲田大学理工学術院、名古屋大学大学院多元数理科学研究科、京都大学数理解析研究所（共同利用・共同研究拠点）、大阪大学数理・データ科学教育研究センター、広島大学大学院理学研究科、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所（共同利用・共同研究拠点）が中核機関として参画する。これをハブに全国の数学・数理科学研究機関が連携する。特に、数学・数理科学のフロンティア形成の中心を京都大学数理解析研究所（共同利用・共同研究拠点）が、諸科学・産業との連携形成の中心を統計数理研究所（大学共同利用機関）が担う。また、訪問滞在型研究プログラムに関しては、全国に先駆けテーマ設定長期滞在

型研究センターである東北大学知の創出センターが取りまとめを行う。

⑥ 所要経費

全体の指揮、世界の研究動向に関する情報収集・発信、成果の取りまとめと協働の促進、相談窓口、プログラム支援などを行う中核となる機関に運営センターと活動推進支援人員を、各連携拠点にサイエンティフィック・コーディネータを置く。データ集積と情報発信のためのシステムを構築する。

全体所要経費：122 億円（内、初期投資：2 億円、運営費等：12 億円×10 年）

（1）初期投資：2 億円

- ・ネットワーク型研究拠点機能整備経費 数学協働システムのクラウド化 0.5 億円
- ・訪問滞在型研究拠点形成費 整備費 1.5 億円

（2）運営費：12 億円/年 x 10 年

（あ）人件費（特任教員、特任研究員、PD、研究補助）

- ・ネットワーク型拠点研究経費 2 億円/年 ×10 年・訪問滞在型研究拠点研究経費 2 億円/年 ×10 年

（い）物件費

- ・ネットワーク型拠点研究経費 2 億円/年 ×10 年・ネットワーク型拠点運営経費 2 億円/年 ×10 年
- ・訪問滞在型研究拠点研究経費 2 億円/年 ×10 年・訪問滞在型研究拠点運営経費 2 億円/年 ×10 年

⑦ 年次計画

平成 28～37 年度（10 年間）

（具体的な計画）

平成 28～29 年度：

- ・諸科学・産業において数学的知見や手法を活用することによる解決が期待できる課題（ニーズ）を発掘し、具体的な課題解決型研究へとつなげるための、多様なプログラムを実施する。文部科学省の「数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」も着実に実施する。
- ・重点テーマの研究プロジェクトを推進する。運営委員会が公募・選考し、数学・数理科学の深化・展開をもたらす社会的に喫緊の課題に対して研究プロジェクトを立ち上げ、諸科学・産業と連携して問題解決に取り組む。
- ・中・短期訪問滞在型の研究プログラムを既存の施設を利用して行う。特に短期滞在型においては、ワークショップ開催を実施するとともに、チュートリアル・サマースクールなど、数理科学人材・データサイエンティストの育成を行う。
- ・長期訪問滞在型の研究拠点の運営のあり方の基本方針を検討するための委員会を立ち上げ、報告書を取りまとめる。

平成 30～33 年度：

- ・重点テーマの研究プロジェクトを実施するとともにテーマの見直しを行う。
- ・長期訪問滞在型の具体的な運営体制と規則を検討する委員会を立ち上げる。

平成 34～37 年度：

- ・重点テーマの研究プロジェクトの中で成果がでているものを集中的に研究できる体制を作る。
- ・長期訪問滞在型の研究プログラムを実施する。

⑧ 社会的価値

平成 18 年の報告書「忘れられた科学—数学」で、我が国の数学研究を取り巻く厳しい状況、諸科学・産業との融合研究の必要性が指摘された。製造業においてかつては国際的に優位であった日本製品のシェアが年々減少していく中、産学が団結して我が国の国際競争力を取り戻すため、数学・数理科学が中心となって諸科学・産業との協働によるイノベーションを継続的・組織的に推進する基盤を構築することは喫緊の課題である。本計画においては、大学院生や若手研究者のイノベーション創出にからむ各種プログラムへの参画、国内外の数学・数理科学研究拠点との研究交流、様々な形態のインターンシップ制度、PBL(Project Based Learning)、異分野との共同研究への参加などを通して、数学・数理科学側だけでなく諸科学・産業側が期待する人材育成に努めることには大きな社会的価値がある。

⑨ 本計画に関する連絡先

小谷 元子（日本数学会）

非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク研究計画

① 計画の概要

本計画は、世界的にトップレベルにある日本のプラズマ研究（乱流、光、機能の3分野）を「非平衡」の概念のもと融合しプラズマ学における日本の更なる国際的優位性と競争力を強化、プラズマ三分野の融合による新学術領域を創成する。自然認識と非平衡プラズマの「学理」を提示する。

本計画では「非平衡極限プラズマプラットフォーム」を構築する。そこでは、ミクロの世界から宇宙天体にいたる自然界に存在するプラズマの普遍性を探求し、「揺らぎ・構造・機能」の観点からその共通原理を求める。また、各分野の極限を迫った最先端研究を推進する。これにより 10 桁以上も異なるスケールのプラズマ研究の基礎となる計測・解析法共有のためのネットワークを促進する。また、三分野独自に開発してきた研究手法を互惠相補的に活用し、プラズマ学のみならず他分野にも役立つ新たな科学的手法に発展させる。さらに、これまでのプラズマ研究で培った理論・シミュレーション・実験の統合的方法を適用し、世界トップレベルの研究者の連携によってプラズマ科学の新領域を開拓する。

本計画の推進体制は、九州大学を中核拠点とし、強力な国際的競争力を持つプラズマ研究機関が連携する。プラズマ学の国際的統合拠点として既存の国際共同研究の枠組みを利用し日本のみならず頭脳循環を図りつつ、新領域を担う国際的人材を育成し国際キャリアパスを確立する。また、本計画は学会に広く認知され、物理学会領域 2 及びプラズマ核融合学会において「非平衡極限プラズマ」のセッションが、それぞれ 2013 年の分科会及び年会より設立されるなどコミュニティの支持をうけ、現在も活発な活動が続けられている。本計画はマスタープラン 2011, 2012, 2014 及びロードマップ 2011, 2014 の重点課題に選ばれた計画であり既に高い評価を得ている。

② 目的と実施内容

本大規模研究計画では、プラズマの非平衡、特に極限的性質を探索しその学理の樹立を目的とする。日本は乱流プラズマ、光プラズマ、機能プラズマの研究領域において世界的にトップレベルの研究を展開している。その 3 分野を「非平衡極限プラズマ」の概念のもと融合し物理学の新領域を開拓、世界最高水準の研究を推進する。融合で得られる学理は、極限的・非平衡構造やダイナミクス・物理のみならず革新的応用技術を加速し、現代及び豊かな近未来社会の実現に貢献する。

融合研究推進のために建設される「非平衡極限プラズマプラットフォーム」では、特に「揺らぎ・構造・機能」の共通概念のもと普遍的原理を探索する。乱流に関しては、平衡状態において生じる 10 の 10 乗以上の強い極限的揺らぎ（乱流）のもとで、プラズマが自律的かつダイナミックに構造を形成する（軸性ベクトル形成）原理を探索する。特に磁場閉じ込めプラズマの未解決問題の第一原理的理解を提供する。一方、プラズマ（プラズマフォトンクス）によるレーザー光制御によって達成される 10 の 28 乗 W/m^2 の極限的光場で得られる凝縮状態（極限的プラズマ状態と言える）は、新奇物質科学や惑星内部で実現されている超高密度状態を実現し新しい物理学を切り開く。また、対象素材を破壊することなく大量に加工可能な技術はプラズマのみである。プラズマの機能を活用しより微細な 10 の 10 乗レベルで粒子を制御するボンドエンジニアリングの実現を目指す。さらに現代では医療や農業などプラズマが生体系にも応用されている。全国の競争力の高いプラズマ拠点のネットワーク体制によるプラズマの新学術領域の創成と、新領域を支える人材育成と日本を中心とした国際的な頭脳循環を促進する。

③ 学術的な意義

プラズマは普遍的に存在し自然現象の理解には不可欠な物理学の対象である。さらに、自然の理解には「究極の物質」の探求とともに、根元的物質から構成される自然がいかに発展して行くか、「流転する自然」の法則を知ることが人類古来のテーマである。後者はまさに本計画のキーワード「非平衡」の学理であり、その宝庫であるプラズマは格好の研究対象である。本計画で研究対象となる乱流、光、機能プラズマの密度や温度領域は 10 桁以上も異なり、そこでのプラズマの非平衡性の探究は、プラズマの構造形成とダイナミクスの原理的かつ普遍的理解を提示するのみならず地磁気生成、惑星大気・構造、ブラックホール周りの降着円盤など様々な天体現象解明の物理基盤を与えるなど「流転する自然」に対する学術基盤を提示する。

一方、プラズマプロセスが IT 文明の実現に貢献してきたのは周知の事実であるが、その他にもプラズマは陰日向に現代の文明の根幹を支える技術を提供している。本計画で得られる非平衡プラズマの学理は近未来の最先端技術実現のための学術基盤も提供する。例えば、極限プラズマ乱流の理解は超高温プラズマを制御し安全で経済的核融合炉を実現可能とする。また、プラズマは極限コヒーレント光を制御できる唯一のもので、能動的な X 制御法などの技術も開拓できる。プラズマ中に生じる極



図1. 非平衡極限プラズマ分野連携による学理の探求と波及効果

限電磁場の制御によってテーブルトップ加速器や電子顕微鏡が実現可能となる。また、プラズマの極限スケールの揺らぎを制御することでサブ原子レベルでの機能材料の加工も可能となる。「乱流・場・フォトン・粒子」を集团的に制御する物理学の新体系が導かれる。自然認識の基礎となる物理学のみならず、21世紀の超革新的技術の要となる学理を与え、量子ビーム科学、加速器科学、機能性物質創成などの工学や広く生体系への応用へと展開され大きな波及効果を持っている。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

プラズマ分野は基礎から応用まで広く裾野を広げて展開され熾烈な国際的競争状態にある。本計画の主要3分野は、研究テーマでの実績においていずれも世界を先導している。乱流プラズマでは、プラズマ乱流の完全理解を目指した多次元の測定によりプラズマ乱流をクロススケール結合の観点からパラダイムシフトを先導してきた実績がある。現在、一兆円以上の費用をかけてITER（国際熱核融合実験炉）が建設されようとしているが、磁場閉じ込め核融合の原理的理解による実験や効率化による研究費の合理化のためにも、今、プラズマの学理を発展させる緊急性は高い。光プラズマでは、日本オリジナルのプラズマフォトリクスを創出し、プラズマを始め諸相が共存する重相の科学や金属シリコン、スーパーダイヤモンドなど新機能性物質創成法を開拓している。機能プラズマでは、日本は従来のプロセス技術の枠を超えナノとバイオの融合分野を開拓し、さらに医学や農業応用において欧米の雑誌で注目を集め世界を牽引している。また、世界に先駆けて行く日本のプラズマ三強分野の融合研究は、日本オリジナルかつ挑戦的体制であり迅速に国際的優位性と競争力を一気に高めることができる。

⑤ 実施機関と実施体制

九大を研究推進の中核拠点とし、電気通信大学、大阪大学、東北大学、核融合科学研究所、金沢大学、名古屋大学を連携して全国共同研究を展開する。中核拠点には統括事務局を設置し、研究支援、運営事務、及び組織運営をプロジェクトディレクターの下に実施するとともに、全国共同機器利用、年次報告・評価、国際評価などの責任体制を支える。また、「研究連携統合委員会（仮称）」を置き融合研究を効率的に推進する。なお、本連携ネットワーク研究ではクロスアポイントメントなどの人事システムも積極的に利用し研究者循環を図り3分野の「知の循環」を促進する。プラズマ科学の新領域を担う若手を育成する。

⑥ 所要経費

所要経費は10年間の総額119億円（設備費65億円 運営費54億円）で前回と同額とする。設備費は、先進的新設備「非平衡極限プラズマプラットフォーム」の構築に使われる。このプラットフォームの構築なくしては本ネットワーク研究計画で提唱する極限の実現は困難であり、その構成は強い乱流場、超高強度光場プラズマ、プラズマ界面の観点から極限的非平衡性を実現する実験設備と、計測・解析法を共有するためのネットワークシステムからなる。10年間の運営費には、このプラットフォームの運転経費（29億円）と、既存装置の共用や準備研究への活用経費（5億円）、学術研究員等人件費含む研究経費及び運営費（20億円）を計上している。

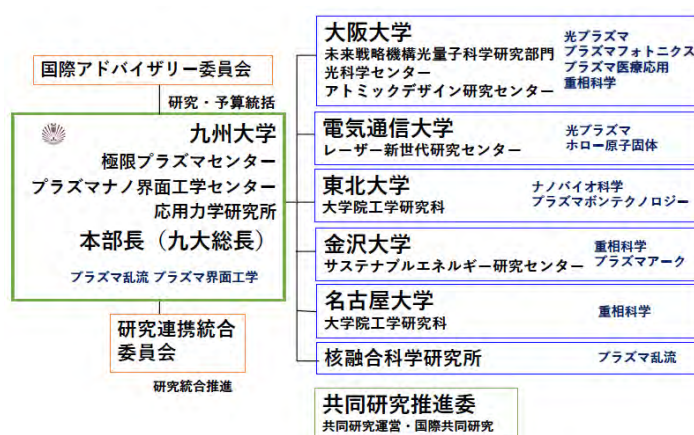


図2. 非平衡極限プラズマ研究連携ネットワークの組織と連携

⑦ 年次計画

研究継続期間：10年間（平成28～37年度）。

最初の3年間では、「非平衡極限プラズマプラットフォーム」を立ち上げる。次の3年間には非平衡極限プラズマ実験・理論・シミュレーションの統合研究法により、「乱流・場・フォトン・粒子」を制御する観点から学理の大系化を目指す。非平衡極限プラズマの学理大系化を目指した研究を、既存実験拠点の強化、理論的・基盤的方法により推進する。プラズマから未開拓の非平衡物質状態へと広がる新学術分野を創成する。後半の4年間において、創成した新学術分野を更に普遍的視野から深化させ学術的発信に努め、学理応用を展開し新機能物質創成を進め成果の社会還元を集中的に行う。

⑧ 社会的価値

現在の日本はノーベル賞の受賞者数に端的に表れているように、自然科学分野において世界的にも優位にある。究極の物質とともに物理解の根幹をなす「万物流転」の法則の確立を目指す本計画は、自然科学の最先端研究であり国民に誇りを与え文化的観点からも社会的価値が高い。一方で、プラズマの活用により、半導体素子製作にムーアの法則が継続し現在の豊かな情報化社会が実現しており、日本にはそれらを先導してきた実績がある。さらに、これからの技術であるフレキシブルデバイスやウェアラブルデバイスなどの加工は対象を破壊することない非平衡プラズマの能力を持って初めて可能となる。エネルギー環境科学の観点からは、プラズマ乱流の理解や重相科学の進展は核融合炉システムの学問基盤を提示し、脱炭酸ガス社会へ駆動する大きな科学的意義を持っている。さらに、プラズマ学は、核融合、プロセスなどの既存の範囲を超えてスーパーダイヤモンドや金属水素などを始めとする新物質状態や新機能性新材料創成、さらに医療や農業などの生体系など多岐に渡って応用されている。さらに豊かで安全安心な近未来社会の実現に向けて、非平衡プラズマの研究は高い社会的価値を持つ。

⑨ 本計画に関する連絡先

藤澤 彰英（国立大学法人九州大学・応用力学研究所）

パワーレーザーによる高エネルギー密度科学グランドアライアンス研究計画

① 計画の概要

本計画は、次世代パワーレーザーを開発・活用し、オールジャパンの体制で学術創成から産業イノベーションにつながる高エネルギー密度科学の開拓を推進する。高エネルギー密度科学開拓を目的とした超高強度レーザー、繰り返し高出力レーザー、レーザー量子ビームの3種類の光量子ビームを有する国際競争力ある多機能超高強度レーザーシステムを構築する。これにより強い光場と物質との相互作用のフロンティアとして、光と真空の非線形相互作用研究による「光量子真空物理学」の開拓を推進する。また物理学や天文学あるいは地球物理学といった既存の学理体系に不連続な革新を誘起するきっかけを創るとともに、産業イノベーションを切り拓く広範な新技術の源泉として、高エネルギー密度科学開拓を我が国が主導することを目指す。大阪大学と量子科学技術研究開発機構を中核機関とし、関係する研究機関が連携協力して次世代大型システムを構築するとともに活用する。また既存のネットワークを活用・発展させ、高エネルギー密度科学ならびにパワーレーザー科学に関する国際的な頭脳循環を駆動するとともに光科学・物質科学の新領域を担う人材を育成する国際拠点機能を構築する。

② 目的と実施内容

本計画は、レーザー技術の革新により可能となる未踏の超高強度の光を創り出し、自然の新たな姿を探索すると共に、それを実現するパワーレーザーが持つポテンシャルを活用することを狙いとし、オールジャパンの体制で研究を進めるものである。これにより、物理学や天文学あるいは地球物理学といった既存の学理体系に不連続な革新を誘起するきっかけを創るとともに、産業イノベーションを切り拓く広範な新技術の源泉として高エネルギー密度科学開拓を我が国が主導することを目指す。高エネルギー密度科学は、光量子真空物理学、高エネルギー物理学、宇宙天文学、地球惑星科学、プラズマ物理学、超高圧物理・化学、光量子ビーム科学、核融合科学、プロセス工学など、極限的な状態の物質と光と真空を対象にした学際的な分野である。本計画ではわが国独自の手法と技術により、多機能パワーレーザーシステムを構築する。これは高出力レーザー(10kJ/0.1Hz)、超高強度レーザー(30PW/0.1Hz)ならびにレーザー加速電子ビーム・放射光の3種類のビームラインから構成される。先鋭性と多様性を備えた本装置を多様なユーザーの利用に供する。本計画の実施期間は10年間とし、前半5年間でシステムを構築し、光量子真空物理学開拓のための実験系の最適化を行うとともに学術創成から産業イノベーションにつながる高エネルギー密度科学およびユーザー提案による新領域開拓を目指した実験を開始する。後半5年間は、光と真空の相互作用に関する本格的な実験を行うとともに多様なユーザー実験を推進する。

③ 学術的な意義

本計画では、高耐力大型光学素子、レーザーセラミック、半導体レーザーなど我が国の競争力あるレーザー関連技術と独自のプラズマデバイス技術や放射光技術を集約した統合システムを構築する。様々な高エネルギー密度状態をつくり観測できる世界で唯一のパワーレーザー複合大型システムとなる。これによりわが国のレーザー技術の主導的地位を確立するだけでなく、新たな光量子ビームによる物質科学の新領域開拓をはじめ学術の創成から産業創出に渡る幅広い観点で新たな価値を創出できる高エネルギー密度科学を開拓できる。例えば、高エネルギー陽子運動を直接制御できる相対論プラズマや真空分極を対象とした研究が展開できる。真空光散乱など量子電磁力学(QED)における非線形光学効果に関して、独自の手法により真空非線形効果を観測できることが提案されている。また、低運動量移行を伴う非線形光-光散乱により、sub-eVの軽い質量を有する暗黒物質源や暗黒エネルギー源を検出できる可能性がある。これらの真空非線形過程の測定は、さらなる非線形QED開拓に新たな展開をもたらす可能性がある。またパワーレーザーによる超高磁場(>10 キロテスラ)や超高圧力状態(>テラパスカル)などの極限的環境を利用した宇宙・天文・惑星物理、物性物理に関連した領域の開拓や先進非破壊検査用小型量子ビーム、新重元素創成のための中性子源、イオン源などの量子ビーム科学、超高密度・超高温プラズマによる核融合科学、さらに物質材料科学やプロセス工学に多くのインパクトある成果が期待できる。



④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

わが国では、阪大レーザー研/量子機構関西研で2PW/PW レーザーが開発されレーザー技術とともに高エネルギー密度科学に関する多くの優れた成果が得られている。また阪大独自のプラズマフォトリックデバイス技術により世界に先駆け「使えるレーザープラズマ電子加速器」の実現とともに量子機構、理研、KEK と連携したレーザー加速電子放射光システムの開発を行っている。また真空の非線形性に関する理論研究が阪大、量子機構、広大などで実施され、予備的実験が阪大や京大、東大、理研放射光センターなどで開始されている。

国外では、超高強度光学に関するプロジェクトが多数開始されている。例えば東欧3カ国では3つの欧州超高強度レーザー施設(予算875ME)、仏国では10PW レーザー建設が進められている。米国では、ロチェスター大学の75PW レーザーシステム設計が正式に予算化された。アジアでは韓国光州科学技術大学で、4PW レーザーが稼働を開始している。本計画により、世界的に発展が著しい超高強度光学・真空量子光学研究への本格的な取組みが可能だけでなく、幅広い高エネルギー密度科学の新たな深化の先導となる。

⑤ 実施機関と実施体制

本計画は、中核機関(大阪大学、量子科学技術研究開発機構)が次世代大型システム開発体制ならびシステムを利用した研究推進体制を構築し計画全体を推進・統括する。既存のネットワークを活用し国内外の研究機関と連携し本計画を推進する。

・次世代パワーレーザー複合大型システム開発体制

a) 10PW 超高強度レーザー：阪大(レーザー研)、量研機構(関西研)、電通大(レーザーセンター)

b) 繰り返し高出力レーザー：阪大(光科学センター、レーザー研)、電通大(レーザーセンター)

c) レーザー加速電子放射光ビームライン：阪大(光科学センター)、量研機構(関西研)、理研(放射光科学センター)、高エネ研(物構研)、長岡技大(工)、京大(化学研究所)

⑥ 所要経費

所要経費総額：210 億円

装置建設経費(1-5 年度) 小計 180 億円

- ・高出力レーザーライン(100 億)：10kJ/12 ビーム/ $>0.1\text{Hz}/1\text{--}10\text{nsec}$ /セラミック増幅器/パルス波形整形
- ・10PW 超高強度レーザーライン(40 億円)：10PWx3 ビーム/励起光源は高出力レーザーライン一部利用
- ・レーザー加速電子放射光ビームライン(25 億)：2 ビームのレーザー加速電子ビーム
- ・実験チャンバー群(15 億円)：学術研究から産業展開にわたる多様なユーザー利用に対応

研究経費 小計 30 億円

⑦ 年次計画

研究継続期間：10 年間(2016~2025 年度)

2016-2018 年度

- ・光-真空相互作用実験最適化、レーザーの配置ならびに実験チャンバーの最終設計
- ・1Hz-PW レーザーシステム試作、スケーリングによりシステム最終設計
- ・高平均出力レーザーシステムの製作、新規レーザー加工・プロセスに関する物理研究などに供給

2018-2020 年度

- ・本格的パワーレーザーシステムの建設を開始
- ・kJ 励起用パワーレーザーは単独利用可能とし、無衝突衝撃波、磁気リコネクションなどの実験室宇宙物理やテラパスカルを超える超高圧力固体状態を実現し、惑星物理、超高圧物理・化学の開拓を開始

2021-2025 年度

- ・総合システムを利用し様々な高エネルギー密度科学に関する実験的研究を展開する。

⑧ 社会的価値

本計画で推進する光量子真空物理学開拓や実験室宇宙物理・惑星物理研究は宇宙の謎を解き明かすうえで大きなインパクトを与えるものとして期待できる。一方で、次世代レーザー技術は、レーザー加工・プロセッシングなどにも必要とされており、本計画は産業にイノベーションをもたらす原動力となる。例えば高強度レーザー照射により、高エネルギー電子、X線、イオン、中性子などが高輝度・短パルス源として生成される。レーザー生成小型プロトン源の実用化により電池開発現場において、リチウム電池内のリチウム分布の核反応分析計測が可能になり、電池の高性能化が促進される。高エネルギー電子ならびに γ 線は大型構造物や自動車エンジン透視などの産業分野に、短パルス中性子ビームは、同様の産業分野や、ホウ素中性子捕獲がん治療など医療分野への中性子利用を促進する。さらに従来の切削加工時間を大幅に削減できる可能性を秘めたスーパーダイヤモンドなどを始めとするこれまで地上に存在しなかった新物質材料創成など学術とイノベーションの協奏と結合が期待できる。

⑨ 本計画に関する連絡先

兒玉 了祐(大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター、大阪大学・光科学センター)

極限コヒーレント光科学イノベーション： THz 波から X 線までの高強度・極限コヒーレント光と物性光科学の共同研究施設

① 計画の概要

THz(テラヘルツ)波から X 線までの、テーブルトップ高強度・極限コヒーレント光を、レーザー科学・技術をベースに自主開発・実用化し、光科学・物性・光産業ニーズ/シーズを共同研究するハブ施設を、東京大学・柏キャンパスの北側未利用土地に新設する。近年の著しい高強度レーザーと波長変換技術の進展により、THz 波から X 線まで、6 桁の広い周波数帯域の極限的に高いコヒーレンスを持つ光を作り出すことが可能になった。極限コヒーレンスを活かせば、アト秒超高速光、あるいは相対論的重力敏感な超精密光を発生し、それらを光科学・物性研究へ応用する道が拓ける。また、THz から X 線までのマルチパルスを同時に発生して組み合わせることで、動作中の触媒・光加工・光デバイスなど社会・産業ニーズにも対応したシステムや現象の超高速ダイナミクスを調べるオペランド分光が可能になる。

技術的課題は、限界波長領域でのフォトンフラックスの不足、利用プラットフォーム未整備による光ビーム利用効率の低さである。前者は、キロワット産業用レーザー技術を極限レーザー開発に組み入れ約 100 倍の高強度化を図り解決する。後者は、加速器放射光施設で培われた物性研究ビームライン技術をレーザー施設に導入し、連携部局や協力機関のアウトステーションを設け、物性研究所で培われた全国共同利用ネットワークを活用することで解決する。同時に産学連携を推進し、産業技術利用、基礎研究、産業課題の解決、新産業技術創出のループを回転させ、開発を加速する。本施設は、レーザー光源をベースとするので、加速器放射光・量子ビーム光源などと比べてはるかに、省予算・省スペースである。全国各地への普及や機能特化した姉妹施設との連携も可能である。全国共同利用ネットワーク構築を視野に入れ、その中心ハブとなるレーザー施設とする。

② 目的と実施内容

東京大学物性研究所では、物性応用を目指した極限的な性能をもつレーザーを開発し、高強度超短パルス技術と波長変換技術を組み合わせ、可視域はもちろん THz 波から X 線までのコヒーレント光の同時発生を既に達成している。しかしその光強度は、波長変換前のポンプ光源出力により決まり、現在は固体レーザーポンプ光源の熱負荷により 10W 程度が限界である。本計画では、近年著しく開発が進んだ半導体・ファイバー・セラミクスなどの産業用高出力レーザー技術を、ビーム結合技術やモード変換技術を介し、先端レーザー技術と融合させ、ポンプレーザー光源を平均出力 1kW 程度にまで安定・高強度化し、THz 波や軟 X 線の光強度を約 100 倍増大させ実用化する。

物性研究所では、極限レーザー/先端分光研究部門と軌道放射物性研究施設を統合し、10 研究室規模の極限コヒーレント光科学研究センターを発足させ、レーザー科学と放射光科学を融合した新体制を整えている。本計画では、高強度かつ同期して出力される THz 波から軟 X 線までのコヒーレント光を用い、放射光分野で発展してきた X 線分光や光電子分光と、レーザー・光物性・量子エレクトロニクス分野で発展してきた超高速非線形コヒーレント分光を、同時計測するシステムの組織的開発を行う。放射光施設で培われた物性研究ビームライン技術や協力機関アウトステーションをレーザー施設に導入し、物性研究所の全国共同利用ネットワークを活用し、多数の研究者が利用できるレーザー光源をベースとした物性研究のハブ施設を構築する。

③ 学術的な意義

アト秒 X 線パルスは現状でも一部の化学試料には適用できているが、さらに 100 倍高強度化できれば、超高速固体物性計測に実用でき関連科学技術が格段に進展する。光電場で駆動された電子の運動の実時間追跡、内核電子遷移ダイナミクス、固体から生体物質の超高速構造変化など、未踏の物性物理の基礎学術開拓が可能になる。アト秒領域でのパルスの高速化には、周波数成分の広帯域化、即ち X 線領域への短波長化が必要であり、ポンプ光の高出力化が必須となる。さらに、周波数標準とリンクして光電場の精密制御技術を確立すれば、光コム技術により 1Hz オーダーでの超精密分光、高分解能光電子分光などにつながる。本計画は、これらの学術の根幹を担う。

本計画で THz 波・中赤外光の 100 倍の高強度化を達成し、これを用いて固体を破壊限界直前まで強励起し、同期した THz・可

極限コヒーレント光科学イノベーション：THz波からX線までの 高強度・極限コヒーレント光と物性光科学技術の協創施設



視・X線の光を用いた多様な分光手法で多角的プローブができれば、固体系の強光子場科学・限界光駆動科学が創出される。希ガス原子への高強度レーザー照射は、高次高調波発生を生み、さらに原子・分子系の強光子場科学という新分野を生んだ。固体系にはエネルギースケールの異なる様々な秩序と素励起が存在する。それらを選択的に強駆動できれば、原子・分子系よりも多彩な新学術領域が拓ける。

高強度光パルスを用いた反応・加工・変調の誘起と、THz・可視・X線の光を用いた多角的モニターは、動作中の触媒・光加工・光デバイスの状態やダイナミクスを調べるオペランド分光を可能にする。物性物理学の研究対象を、伝統的な基底状態・平衡状態や線形応答から、励起状態・非平衡状態・非線形現象へと広げ、これまで経験則や現象論しか存在しなかった分野に学理を築き、学術へと発展させる。物理学に根ざした光材料の根源的な耐性・物性の学術的理解と制御は、翻って新たな極限的レーザー・コヒーレント光源開発に役立つ。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

レーザーと放射光施設の高度化が急速に進み、両光源に基づく光科学の融合は世界の潮流である。主要放射光施設でもレーザーとの複合実験が進展し、時間分解光電子分光は世界中に一気に拡散した。しかし、殆どは市販レーザーを用い、その性能が制限されている。本計画の特徴は、10研究室が緊密に連携する極限コヒーレント光科学研究センターにおいて、世界無二の極限的な性能のレーザー光源を独自開発し、直ちに物性研究に用いる点である。逆に、物性物理学や分光学の観点から最良の光源性能を案出し、それにマッチした極限レーザー光源を自主設計・開発する点である。

⑤ 実施機関と実施体制

東京大学が、中心機関となる。他の参画予定機関は、京都大学、大阪大学、東京工業大学、東北大学、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、理化学研究所である。参画機関・部局は、研究チームを本施設アウトステーションに置き、従来の年度単位の客員教授・研究員や共同利用の制度を超え、レーザー物性科学から産業応用までを含む、緊密な連携研究を推進する。東京大学内では物性研究所・極限コヒーレント光科学研究センター（LASOR）が中核組織となり、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構、工学系研究科量子科学研究センター、新領域創成科学研究科、放射光連携研究機構と連携して実施する。

⑥ 所要経費

総経費、48億円

内訳： 建設費（小計35億円）

1. 新設レーザーハブ実験棟（5000m²） 20億円
2. 除振実験棟（D棟）改修・空調・冷却水設備 5億円
3. ポンプレーザー・ビームライン・分光装置 5億円
4. レーザー・分光装置開発費 5億円

運営費（小計13億円）

1. 設備維持費（光熱費、保守費を含む） 5億円
2. 装置消耗品 3億円
3. 人件費（施設特任教員/技術員） 5億円

⑦ 年次計画

第一期： 基盤建物の整備（初年度～3年度、3年間）

レーザーハブ実験棟を新たに建設する。レーザー装置に必要な、恒温・低振動、清浄空気的环境をブース化して整備する。周囲に、複数の各種共同利用・分光実験ステーション、アウトステーションを配置し、高強度・極限コヒーレントレーザーとの間をビームラインを用いてつなぐ。新実験棟の建設が完了後、準備開発したレーザー、分光計測システムなどの移設を行う。移設後、既存除振実験棟（D棟）の空調・実験冷却水設備の改修工事を行う。

第二期： 光源と計測システムの整備（4年度～6年度、3年間）

極限コヒーレント性能を有するレーザー光源と、オペランド分光ステーション、超高分解光電子分光システム、高強度THz-X線時間分解分光システムなど、計測実験システムの開発・整備を行う。物性科学研究の共同利用・共同研究を開始する。

第三期： 光源・計測装置の高度化と共同利用の拡大（7年度～10年度、4年間）

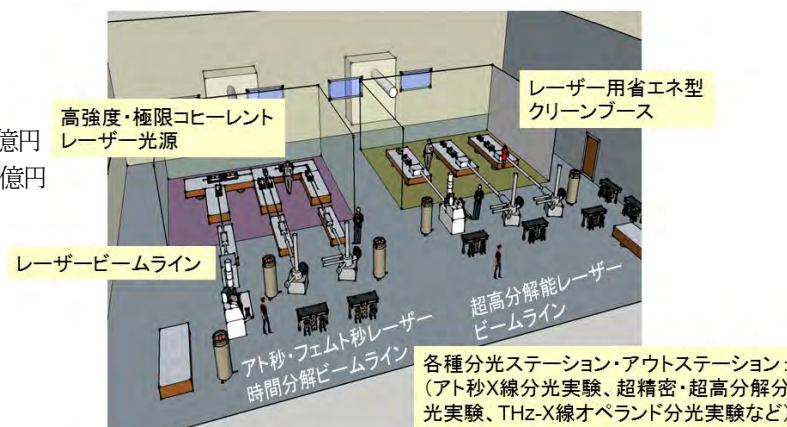
光源の高強度化を推し進め、「水の窓」領域（300-500eV）を越え1keVまでのアト秒軟X線コヒーレント光の発生と利用研究や、限界光駆動・レーザー加工に関する産学連携研究などのための体制を整える。光源の高出力化、コンパクト化を進める。

⑧ 社会的価値

本計画で開発するキロワット超高速レーザーは、限界駆動下の物質の様態、破壊の前駆現象、光加工や破壊などの基礎研究を可能にする。その研究成果は、逆に、壊れにくい光学部品の開発に役立ち、さらなる高強度レーザーを生み出し、産業応用と基礎科学研究の両方に貢献する。産業技術利用、基礎研究、産業課題の解決、新産業技術創出のループを回転させ、開発を加速することができる。オペランド分光実験技術は、動作中の触媒・光加工・光デバイスなど社会・産業ニーズに対応した現象の超高速ダイナミクス研究に役立つ。物性物理学のみならず、物質の関与するほぼすべての科学研究分野、化学、生物、医学、地球惑星科学と新産業創出に広く貢献できる。

⑨ 本計画に関する連絡先

瀧川 仁（東京大学・物性研究所）



大強度低速陽電子研究施設

① 計画の概要

電子リニアック及び小型サイクロトロンを用いて生成した大強度低速陽電子ビームを利用して物性物理学及び原子分子物理学の研究の共同利用を行う施設を建設する。電子リニアック法では、加速した電子をターゲットに当てて、制動放射 X 線からの電子・陽電子対生成によって $5 \times 10^9/s$ という世界最大強度のエネルギー可変低速陽電子ビームを作る。小型サイクロトロン法では、イオンを加速してターゲットに当てて陽電子放出放射性同位体を生成し、 β 崩壊によって生ずるスピン偏極陽電子を利用する。短寿命核種生成によるオンラインビーム方式と、長寿命核種生成によるオフラインビーム方式の 2 方式を両立させる。この方式は、強度面では上の電子リニアック方式に及ばないが、スピン偏極陽電子が容易に得られるという利点がある。

上記 2 種類の方法によって生成される特徴的な陽電子ビームを相補的に用いて、物質科学や原子分子科学の研究のより一層の発展を促し、世界トップレベル研究拠点の形成と知の基盤の強化、あるいは素材・ナノテクノロジー分野における新たな価値創出のコアとなる技術の強化を図り、「科学技術イノベーション」を強力に推進する。

② 目的と実施内容

世界最大強度 ($5 \times 10^9/s$) のエネルギー可変低速陽電子ビームを実現する電子リニアック法では、あらゆる種類の低速陽電子ビーム実験を大強度で可能とするために、電子リニアックのパルス構造のまま最大強度で使用するほか、ストレッチビーム・高輝度ビーム・短パルスビーム・マイクロビームなどに加工して使用する。それにより、物質内部・表面・界面など任意の部位における構造欠陥評価や、陽電子回折法 (TRHEPD および LEPD) による物質最表面構造解析、ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 法による表面研究、原子分子散乱等の陽電子・ポジトロニウムの基礎研究を行う。

小型サイクロトロンでは、これまで実績のある ^{28}Si や ^{68}Ge 等の陽電子放出核種を中心に製造する。陽電子の輸送にはスピン偏極の向きを自在に制御できる静電場輸送方式を採用する。オンライン実験ステーションとしては、スピン偏極ポジトロニウム飛行時間測定 (SP-PsTOF)、スピン偏極低速陽電子線回折 (SP-LEPD)、高磁場印加下その場測定装置、スピン偏極マイクロビームなどを整備する。オフライン装置としてスピン偏極 2 次元 2 光子角相関測定 (SP-2DACAR) や汎用オフラインビーム装置等を整備する。

③ 学術的な意義

陽電子は物質中の電子の性質、特にフェルミ面に関する情報や空孔型格子欠陥の情報のプローブとして利用されてきた。近年、陽電子回折が結晶最表面の構造解析の決定的な手法であることが分かり、多くの成果が得られている。また、ポジトロニウムは金属内部では生成されないため、それを用いれば、他の手法では得られない金属最表面の電子の情報が得られる。特にスピン偏極陽電子ビームを利用すれば、表面の電子スピンの情報が得られ、スピントロニクスの研究が可能である。また表面における 2 次元自由電子層の研究が可能である。さらに、陽電子やポジトロニウム、ポジトロニウム負イオンの基礎研究が可能である。

大強度低速陽電子研究施設が完成すれば、現在では困難な下記のような成果が期待できる。

(1) 種々の結晶最表面の構造とその動的過程の研究：計測時間の短縮により、反応性が高い結晶を含むあらゆる結晶の表面構造解析が可能となる。さらには、表面の構造の動的変化を追うことも可能になる。

(2) 表面スピン研究の高度化：(1) と同様に、あらゆる試料表面のスピンの解析が可能になる。動的な過程の研究も可能になる。

(3) 陽電子・ポジトロニウム素過程研究の高度化：陽電子に関わる素過程の研究の可能性が広がる。たとえば固体表面近傍の格子欠陥や電子状態の研究や、未だ解決されていない固体表面でのポジトロニウム、ポジトロニウム負イオン、ポジトロニウム分子等の生成に関する研究が可能になる。さらに放出されるポジトロニウムを用いて、ポジトロニウムのボーズアインシュタイン凝縮やポジトロニウムの自由落下実験等の実現にも道が開ける。

さらに、大強度低速陽電子ビーム研究施設の実現により、各研究課題のマシントimeが短縮され、産業利用を含めたより多くの共同利用課題の受け入れが可能となり、効率的な成果創出につながると期待される。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

大強度の低速陽電子ビームを得るためには、原子炉からの γ 線やリニアックで加速した電子の制動放射 X 線からの電子陽電子対生成が用いられている。現在世界最大の強度は、ミュンヘン工科大の原子炉を利用した $5 \times 10^9/s$ であり、わが国では、KEK と産総研の双方でリニアックを利用した $5 \times 10^7/s$ という世界第 2 位の強度のビームが実用化されている。KEK では大強度をそのまま生かし、また産総研では短パルス化して使っている。京大原子炉実験所でも原子炉からの γ 線を利用した低速陽電子ビーム装置がほぼ完成している。諸外国の大強度低速陽電子ビームは原子炉を利用するものが多く、デルフト工科大、ノースカロライナ大でも整備が進んでいる。

本計画では、原子炉ではなくリニアックと小型サイクロトロンを用いる。リニアックではミュンヘン工科大を 1 桁上回る世界最大強度の $5 \times 10^9/s$ を目指す。またサイクロトロンを利用するビームでは、他に類をみないスピン偏極大強度ビームが得られる。

⑤ 実施機関と実施体制

本計画の建屋は KEK 内に建設することを想定している。場合によっては、他の研究機関や大学などがホストとなり、他に設置することもありうる。実行組織は、日本陽電子科学会の「大型低速陽電子研究施設建設計画推進委員会」である。同推進委員会は、KEK の低速陽電子実験施設職員及び、KEK 加速器研究施設の職員若干名と、KEK 低速陽電子ユーザアソシエーションの主要メンバーから構成されている。メンバーの所属機関は、北海道大学、東北大学、KEK、筑波大学、東京大学、東京学芸大学、東京理科大学、上智大学、立教大学、千葉大学、京都大学、大阪大学、大阪府立大学、広島大学、原子力機構、量研機構、産総研、理研などである。

⑥ 所要経費

建設経費総額：98 億円

内訳：設計調査 3 億円、建屋設備 40 億円、線形加速器 25 億円、サイクロトロン 10 億円、陽電子生成部・陽電子ビームライン・計測機器 20 億円

運営費総額：10 億円／年

⑦ 年次計画

初年度 調査・概念設計

第2年度 詳細設計・実施設計

第3年度 建屋建設

第4年度 加速器、陽電子ビームライン建設

第5年度 共同利用開始

⑧ 社会的価値

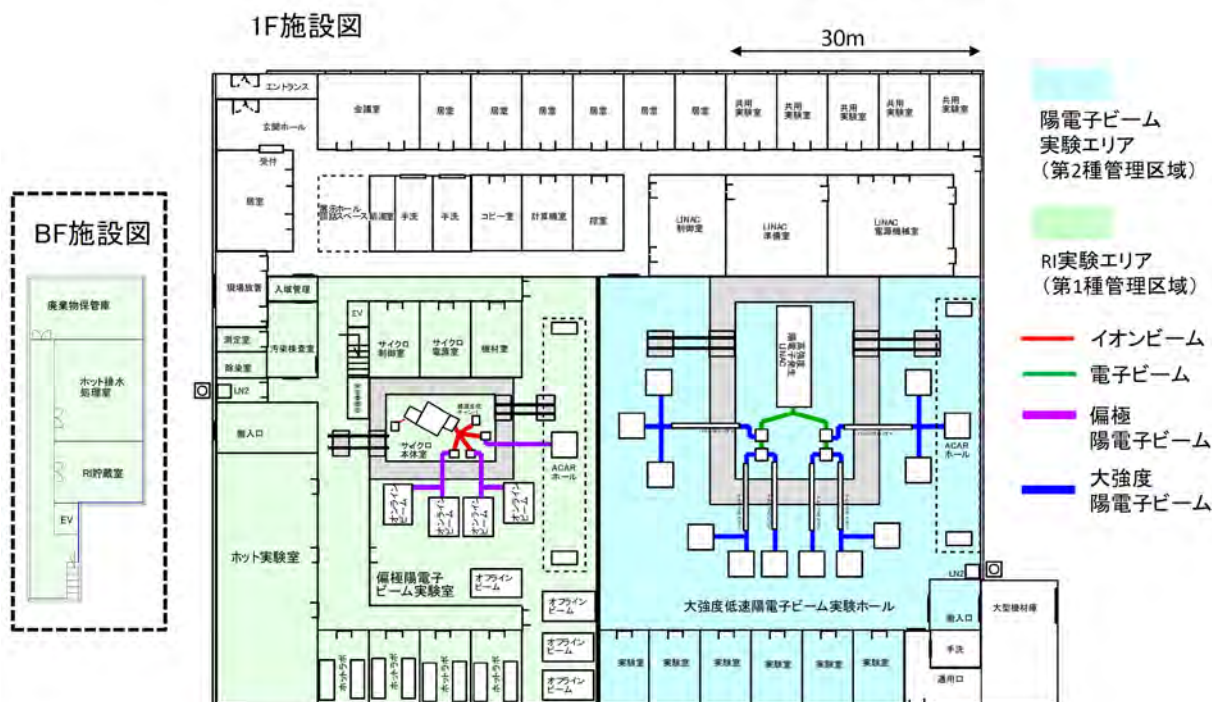
代表的反粒子である陽電子を用いた基礎科学および材料科学の研究施設は、国民の科学に関する関心を高める。この施設では、一般市民への科学普及活動にも力を入れ、陽電子の基本的性質や応用の原理とその成果ばかりでなく、PET などの医療への応用の解説や反水素の合成などについての解説も幅広く行う。

先端的なモノづくりは、これからも我が国の産業の発展の要の一つである。物質・材料の研究においては、特性・機能の研究と並んで構造（原子の種類や配置）の研究が重要な二本柱である。先端的エレクトロニクスや触媒研究などの表面研究においては、全反射高速陽電子回折（TRHEPD）法が構造解析の決定版となる有力な手段である。それによって表面構造を敏速かつ正確に決定すれば、構造から特性・機能を解明できる機会が増え、画期的な発展が期待できる。また明日の社会を支える計算機の能力増大に対応するためには、低消費電力の半導体デバイスの開発が欠かせない。スピントロニクス技術はブレイクスルーとして注目されている技術であり、スピン偏極陽電子ビームを用いた各種スピン現象の解明や材料開発はスピントロニクス技術の発展に大いに寄与する。

⑨ 本計画に関する連絡先

長嶋 泰之（日本陽電子科学会）

大強度陽電子利用研究施設案



強磁場コラボラトリー2020:次世代強磁場施設の整備

① 計画の概要

我が国が強い伝統をもつ強磁場科学研究を格段に発展させるべく、オールジャパンのネットワーク型研究組織（強磁場コラボラトリー）を構築する。強磁場分野は、近年、科学技術大国で例外なく大規模な強化が行われ、世界的に国際競争は激化しているため、次世代施設への更新により主導権を確保する。新提案として、異なる施設が共有で強磁場設備を整備・運用する新しい仕組みを導入する。強磁場と関連研究者コミュニティでは、2004年から将来計画を定めて、継続的・計画的に構想の実現を図っており、コミュニティの合意は高い水準にある。

② 目的と実施内容

オールジャパンのネットワーク型研究組織（強磁場コラボラトリー）を構築する。強磁場コラボラトリーは、パルス超強磁場と定常強磁場が一体化して機能することで、日本の物質科学・材料科学の国際的優位性を支える土台となる。その中核的施設として、東北大学金属材料研究所と物質・材料研究機構が共同で全日本定常強磁場拠点を整備・運営する。この拠点は、(1)高度なエネルギー制御により省エネで世界水準の 40T 超の定常磁場を発生する先進型ハイブリッドマグネット及び(2)日本の超伝導技術を結集した 30T 級超伝導マグネットを始めとした超伝導磁石群の2つを配置し、高品質の定常磁場を提供する全日本のユーザー施設として運用する。一方、パルス強磁場について



は、東京大学物性研究所を主たる拠点とし、既設の破壊型の電磁濃縮法 1000T 極短時間パルス磁場、準定常強磁場、非破壊型パルス磁場装置を活用しつつ、非破壊パルス磁場の国際的標準となっている 100T の非破壊パルス磁場を整備する。大阪大学は、予算化された大型コンデンサ電源を活用した超強磁場・超高圧・極低温の複合極限科学のための拠点として運用し、西日本のサブセンターとして機能させる。さらには、放射光、中性子施設等における強磁場実験の要求に応える可搬型の共用強磁場発生装置を整備し、共同で運用する。このように、異なる特徴をもつ強磁場装置群を有機的な連携により相補的かつ効率的に整備・運営することで、物性物理学、物質科学、材料科学の主要な構成要素の1つである強磁場科学の国際的優位性を確保する。整備する主要設備:全日本定常強磁場拠点(先進 40T 級ハイブリッド磁石、30T 超伝導磁石)、非破壊パルス強磁場施設(100T 0.1 秒)、可搬型共用強磁場装置(25T 超伝導磁石および 50T パルス磁場装置)。

③ 学術的な意義

強磁場は物性物理学、物質科学、材料科学に必須の基盤的な環境である。実際に、(1)強磁場下での物質の応答から得られる電子構造の知見が諸物質の根源的な理解を可能にし、(2)超強磁場下で出現する新物質相や新現象により物質科学の新地平が切り開かれている。物性物理学における例を挙げれば、強磁場環境は、鉄系超伝導体など日本がリードする新物質の発見に対し電子状態を評価するためのプローブとして、また超伝導状態などの電子状態を制御するためのツールとして、必要不可欠な役割を果たしている。さらに、強磁場下の物質研究により、量子ホール効果、磁場誘起超伝導、さらには、近年のグラフェンにおけるディラック電子等、多彩な現象の発見とそれに伴う物質観の革新が行われている。しかしながら、物質の内部磁場に比べて、人工的な磁場の強度は未だ十分ではない。パルス強磁場は、瞬間的だが強い磁場を発生するという特徴を生かし、探索的な基礎研究で威力を発揮する。これを整備して強磁場のフロンティアを追求し、ひいては極限的環境における物質の予想外の状態を明らかにすることは、物性科学・物質科学の営みそのものであり、そこには大きな可能性と意義がある。一方、物質科学の深化と展開から生まれる材料開発においては、安定で高品質な定常強磁場環境が必要である。実際、超伝導材料、高機能・汎用元素型の磁気材料の開発は、主に定常強磁場で行われており、世界水準の 40T 超級の施設を整備することは、エネルギー・環境・医療分野のイノベーションにとって必要不可欠である。また、基礎的研究においても、NMR、走査顕微鏡など定常磁場を必須とする計測法も数多い。このように、強磁場施設は、新物質・新現象の発見とその展開・応用の両側面を支えかつ両者を繋ぐ重要な位置を占めており、その整備は、物質・材料科学の発展を通じて人類の物質観を豊にする重要な学術的な意義がある。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

強磁場分野は、近年、科学技術大国で例外なく大規模な強化が行われている分野である。その理由は、物質・材料科学研究の重要性が増しており、強磁場がその中心的な拠点研究施設であるためである。国外では、米国国立強磁場研究所が定常とパルス磁場を統合した施設として整備され、世界最高の 45T のハイブリッド型定常磁石を有している。一方、欧州では、仏が同様の総合的国立施設を形成し、蘭の定常強磁場の更新、ドイツのパルス磁場の新設等が行われ、これらの施設は EU 全体で EuroMagnet という形で統合運用が行われている。また、中国では、欧米に匹敵する強磁場施設が武漢(パルス)、合肥(定常)で国家プロジェクトとして建設・運用され、世界的に国際競争は激化している。その中で、各国ともパルスと定常施設を相補的に

整備している。我が国は、強磁場分野において、歴史的に高い国際競争力を維持し、パルス強磁場においては世界一級の設定を運用する一方、定常強磁場施設は、老朽化で抜本的な施設更新の必要な時期を迎えている。強磁場コラボトリーは、次世代定常強磁場への更新と新準定常磁場の整備により主導権を確保する計画である。

⑤ 実施機関と実施体制

実施機関は、東京大学物性研究所・国際超強磁場科学研究施設、東北大学金属材料研究所・強磁場超伝導材料研究センター、大阪大学理学研究科附属先端強磁場科学研究センターの大学3機関・施設と物質・材料研究機構・強磁場ステーションの4つであり。これら4機関・施設で形成する強磁場コラボトリー運営機構により一体的に運営を行う。定常磁場施設に関しては、既存設備を生かしながら、東北大学と物質・材料研究機構が共同で全日本定常強磁場拠点の整備を行う。一方、100T 非破壊パルス磁場の整備は物性研究所が行い、破壊型の電磁濃縮、長時間パルス磁場、準定常磁場を備えた世界No. 1の総合的パルス強磁場研究拠点として整備し、2012年度に整備した大阪大学の複合極限強磁場設備と合わせて、全日本的なパルス強磁場施設として一体的に運営する。既に、東北大学と物質・材料研究機構は、定常強磁場施設の建設・運営を含む、包括的な人事交流や共同研究を行うための連携協定を2013年度に締結した。一方で、物性研究所と大阪大学は、2016年度から大学共同利用の枠組みを拡張して、共同利用を行う予定である。各施設の運営会議には、他施設の代表を入れて日本全体として連携した運営を既に行っており、これを発展させて、4機関の連携協定による強磁場コラボトリー運営機構を構築する。このような、大学と国立研究開発法人の枠を越えた運営体制の構築は、世界最先端の施設建設・運営のためには必須であり、今後、他分野での研究体制構築のモデルケースとなることが期待される。さらには、今回新提案として、異なる施設が共有で強磁場設備を整備・運用する新しい仕組みを導入し、学際的で分野横断的な研究が自由自在に実施出来る新しい研究連携機能を整える事を目指している。

⑥ 所要経費

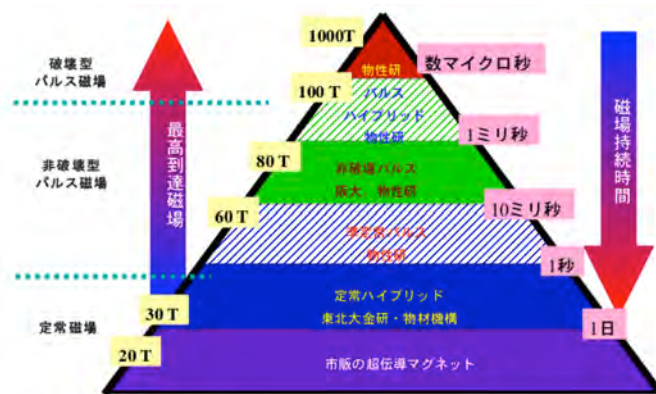
全日本定常強磁場拠点の設備整備総額は55億円であり、その内訳は、定常強磁場発生用のエネルギー蓄積・制御システム18億円、電源及び冷却水循環システムの改良が15億円、ハイブリッド磁石コイル(20T 大口径超伝導磁石および内層水冷磁石)20億円、付属施設改修2億円である。また、予算化された25Tの超伝導磁石をベースにして、従来の水冷磁石の磁場領域を超伝導磁石で全て置き換えるための30T超伝導磁石を設置する費用が10億円である。一方、東京大学物性研究所に整備する100T用の非破壊パルス磁場電源の増強は総額15億円であり、その内訳は、コンデンサ電源増強8億円、建家整備が7億である。さらに、可換型の共用強磁場装置の整備費は、定常とパルス磁場併せて17億円である。以上、強磁場コラボトリー事業の合計で設備費等は97億円である。また、これらの施設の維持・運営経費は、既存の措置経費を含めて年額で、定常強磁場6億円、パルス強磁場4億円、合計10億円である。これには、更新後の施設の運転に最低限必要な人件費の増額分を含んでいる。

⑦ 年次計画

強磁場コラボトリーは、マスタープラン2011および2014に登録した計画のうち、25T超伝導磁石と大阪大学のパルス強磁場施設整備が終了し、今後、(1)全日本定常強磁場拠点、(2)物性研究所の非破壊100Tパルス磁場の2つの次世代設備を整備する第2段階が本格的に始まる。

(1)全日本定常強磁場拠点の整備:全日本定常強磁場拠点の整備は最優先課題であり、これを3年1期として、3期合計9年間で整備する。第1期では、定常磁場を超伝導磁石で置き換える30T超伝導磁石を東北大学に整備する。第2期では、定常強磁場発生用のエネルギー蓄積・制御システムを導入と、電源及び冷却水循環システム改良を行い、省エネルギーで35Tまでの定常強磁場運用を可能とする。さらに第3期では、ハイブリッド磁石コイル(20T大口径超伝導磁石および内層水冷磁石)を整備し、世界水準の40T超の定常磁場の発生を目指す(2)物性研の100T非破壊パルス磁場:世界水準の100T級の非破壊パルス磁場施設に関しては、1期目の3年でコンデンサ電源の増強を行い、既存設備と併せて運用する事で世界一のパルス強磁場施設として整備する。阪大の設備についても必要な更新を行う。(3)各国で次期強磁場計画の目玉とされている放射光、中性子用強磁場計画に対抗するため、第2期の3年で可搬型共用強磁場発生装置を整備する。施設・設備は、完成後10年運用し、改良・改修によりさらに10年間の運用を行う。

図1は、強磁場の性能指標である磁場強度と磁場持続時間の関係を示すグラフである。縦軸は磁場強度(T)で、横軸は磁場持続時間(s)で示されている。グラフには、定常磁場、パルス磁場、および超伝導磁石の性能が示されている。また、磁場の発生機構や磁場の利用分野も示されている。



⑧ 社会的価値

強磁場利用研究はエネルギー、環境、医療分野におけるイノベーションにおいて大きな社会的な役割を有している。送電、超伝導列車や核融合等のエネルギー・交通分野、生命科学、医療装置等で必要な超伝導材料・機器開発には、強磁場施設利用が必須であり、日本の超伝導線材および機器メーカーはこれまで強磁場施設を利用して開発を行って来た。その成果と利益は社会的に広く還元されている。また、モーターやパソコンなどで多用される磁気材料や磁石の開発には、強磁場が必ず用いられる。さらに、省エネルギー、省資源の高機能・汎用元素型の磁気材料開発が課題となっているが、そのために強磁場施設の高度化が強く産業界から期待されている。創薬、医療、触媒開発、分析、半導体等の分野で強磁場施設と研究成果が広く使われている。強磁場施設は、我が国の材料開発と関連産業に必要な不可欠な基盤の設備であり、その社会的価値は極めて高い。

⑨ 本計画に関する連絡先

野尻 浩之(東北大学金属材料研究所)

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

① 計画の概要

本研究では、宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に一樣に存在すると予言されている「宇宙背景ニュートリノ」の崩壊探索を行う。ニュートリノ崩壊時に発生する遠赤外線エネルギーを一光子ごとに2%以下の精度で測定する超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を開発する。Left-Right Symmetric Model では、ニュートリノの寿命は最短で $\tau = 1.5 \times 10^{17}$ 年となるが、そのような宇宙背景ニュートリノの崩壊からの光子は口径 20cm・視野 0.1 度の望遠鏡と赤外線検出器を搭載した人工衛星で 100 日間観測することによって、有意度 5σ で検出できる。この赤外線検出器として、Nb と Al を超伝導素材とする多チャンネル STJ 検出器と分光素子を組み合わせた観測装置の設計・開発・製作を行い、2018 年にこの観測装置を搭載したロケット観測実験を予備実験として行う。このロケット実験によって現在の寿命上限を 100 倍改善できる。以上の Nb/Al-STJ 開発・製作と並行して、将来の人工衛星搭載実験に向けたエネルギーギャップの極めて小さいハフニウムを用いた Hf-STJ についても衛星搭載実験用の光学系を含めた観測装置の開発研究を行う。人工衛星搭載実験は 2022 年頃の実施することを目指す。本研究計画は 2008 年より筑波大学を中心にして進められてきており、現在は国内の 6 大学・4 研究所と海外の 1 大学・1 研究所による国際共同研究グループで、年 6 回程度の計画検討会で実験準備を進めてきた。

② 目的と実施内容

ニュートリノ物理学は 1998 年のニュートリノ振動の発見以来、大きな発展を示している分野である。ニュートリノ振動の観測によって、現在ニュートリノの質量が 0 でないことが示され、3 種類のニュートリノの質量の 2 乗差とニュートリノ混合角は測定されている。しかしニュートリノの質量自体は決定されておらず、今後の素粒子物理学の発展にとって、ニュートリノの質量を測定することは非常に重要な課題である。質量の測定のために、本研究計画では宇宙背景ニュートリノの崩壊を探索する。Left-Right Symmetric Model では、ニュートリノの寿命は最小で $\tau = 1.5 \times 10^{17}$ 年となり、検出可能となる。宇宙背景ニュートリノは宇宙背景放射と同様にビッグバン宇宙初期に生成され、宇宙空間に一樣に存在すると標準宇宙理論で予言されている。これを発見することは大きく宇宙物理学を発展させる。

宇宙背景ニュートリノ崩壊からくる光子のエネルギー分布は高エネルギー端でカットオフがあり、それを測定することで、ニュートリノの質量を決定することができる。そのような宇宙背景ニュートリノの崩壊からの光子は口径 20cm・視野 0.1 度の望遠鏡と赤外線検出器を搭載した人工衛星で 100 日間観測することによって、有意度 5σ で検出できる。この赤外線検出器として、Nb と Al を超伝導素材とする多チャンネル STJ 検出器と分光素子を組み合わせた観測装置の設計・開発・製作を行い、2018 年にこの観測装置を搭載したロケット観測実験を予備実験として行う。このロケット実験によって現在の寿命上限を 100 倍改善できる。Nb/Al-STJ 開発・製作と並行して、将来の人工衛星搭載実験に向けたエネルギーギャップの極めて小さいハフニウムを用いた Hf-STJ についても衛星搭載実験用の光学系を含めた観測装置を開発し、人工衛星搭載実験を 2022 年頃の実施する。

③ 学術的な意義

本研究は、これまでに行われたことのない方法で宇宙背景ニュートリノ崩壊を探索するものである。Left-Right Symmetric Model では、ニュートリノの寿命は最短で $\tau = 1.5 \times 10^{17}$ 年となるが、そのような宇宙背景ニュートリノの崩壊からの光子は衛星実験で 100 日間観測することによって、有意度 5σ で検出できる。我々が 2012 年に発表した JPSJ 論文では、AKARI の観測結果から求めたニュートリノ寿命の下限が 4×10^{12} 年となることを報告すると同時に、この衛星実験の提案を行った。この宇宙背景ニュートリノ崩壊が検出できれば、ニュートリノの質量自体を決定できると同時に、標準宇宙理論で予言されている宇宙背景ニュートリノの発見となる。

本研究で開発する多チャンネル STJ 赤外線検出器と分光素子を組み合わせた観測装置は、高効率・高エネルギー分解能で宇宙赤外線背景放射の連続スペクトルを観測することを可能にするものである。

この赤外線検出器は高エネルギー分解能光子検出器として、他分野での応用が期待できる。たとえば X 線検出に用いれば、物質科学、生命科学で放射光を用いた実験で最先端 X 線検出器として大いに活用されることが期待される。また赤外線一光子検出が可能であることを利用して量子情報通信分野での応用も期待される。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

ニュートリノ物理学の大きな課題は、レプトンにおける粒子・反粒子対称性の破れの検出とニュートリノの質量自体の測定である。前者の探索のために国内では T2K 実験、ハイパーカミオカンデ計画など、海外では米国の DUNE 計画などが実施あるいは準備を進められている。後者の課題については β 崩壊の精密測定実験である KATLIN 実験の準備がドイツを中心に進められおり、それと異なった測定として本研究の宇宙背景ニュートリノ崩壊探索を筑波大が中心となって進めている。宇宙背景ニュートリノの崩壊探索は、ニュートリノ質量決定のみならず、未発見の宇宙背景ニュートリノの発見という点でも非常に重要である。

⑤ 実施機関と実施体制

実施機関は国内機関では筑波大学、JAXA/ISAS、KEK、岡山大学、福井大学、近畿大学、関西学院大学、静岡大学、理化学研究所、産総研、海外機関では韓国ソウル国立大学、米国フェルミ国立加速器研究所である。筑波大学が実施の中心となり、宇

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索研究コンソーシアムを形成しており、実行組織の役割は以下のとおりである。

筑波大学	総括、実験設計・検出器開発・製作・試験、実験シミュレーション、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
JAXA/ISAS	ロケット製作、衛星製作、実験設計、エレクトロニクス開発、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
KEK	エレクトロニクス開発、STJ 検出器性能試験、データ解析
理化学研究所	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
産総研	STJ 検出器設計製作・性能試験
岡山大学	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
福井大学	赤外線ビーム光源開発、STJ 検出器性能試験、データ解析
近畿大学	STJ 検出器性能試験、データ解析
関西学院大学	実験設計、光学系・クライオスタット設計開発、データ解析
静岡大学	エレクトロニクス開発
ソウル大学	STJ 検出器設計製作・性能試験、データ解析
フェルミ研究所	エレクトロニクス開発、STJ 検出器性能試験、データ解析

実施の中心となる筑波大学では上記の役割をはたすべく、教授1名、准教授1名、研究員2名が本研究に専念しており、また筑波大学に2014年に新設された数理物質融合研究センター宇宙史国際研究拠点の代表的プロジェクトとして強力な支援を受けている。

⑥ 所要経費

本研究計画で用いるロケットおよび観測衛星は JAXA/ISAS が設計製作するもので、下記の所要経費には含まれない。2018 年に行う予定の宇宙赤外線背景輻射観測実験ロケットに搭載する遠赤外線観測装置の開発・設計・製作・試験・本実験および、2022 年以降に行う予定の宇宙赤外線観測衛星に搭載する遠赤外線観測装置の開発・設計・製作・試験の所要経費を下記に示す。2016 年度から 2023 年度の所要経費(単位 百万円)は総額 1996 であり、内訳は、計算機システムは総計 520 (2016 年度 30、2017-2023 年度 70)、検出器開発製作は総計 990 (90, 150, 110, 100, 100, 200, 140, 100)、光学系システムは総計 150 (10, 25, 15, 10, 10, 40, 30, 10)、旅費・会議費・論文出版は総計 140 (10, 10, 20, 20, 20, 20, 20, 20)、人件費(研究員 2~4 名、事務補助員 1 名)は総計 196 (14, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26)である。

⑦ 年次計画

本研究では、高分解能で遠赤外線一光子のエネルギーを測定するために、Nb と Al を超伝導素材として用いる多チャンネル STJ 検出器(50 x 8 ピクセル)と分光素子を組み合わせた観測装置の開発を行う。50 ピクセルと分光素子(回折格子)で 15~30meV の遠赤外光のエネルギーを一光子ごとに 2%の精度で測定する。それを 8 列並べることによって位置情報も 8 点得る。

2015 年度までの研究で STJ 作成方法を改善し、ロケット実験搭載用 STJ のリーク電流に対する要求を満たす STJ の作成に成功した。2016 年度に極低温 0.4K で動作する低ノイズ前置増幅器等のエレクトロニクスの開発を進め、この実現によって Nb/Al-STJ 検出器の遠赤外光一光子の検出を実現する。

2017-2018 年度に反射鏡・分光素子・Nb/Al-STJ 検出器を 0.4K クライオスタットに格納した赤外線観測装置を製作する。

2018-2019 年度にこの赤外線観測装置を JAXA 宇宙赤外線背景輻射観測実験ロケットに搭載して観測実験を行う。これは将来の衛星実験の予備実験となる。

これらと並行して将来の赤外線衛星搭載に向けたエネルギーギャップの小さいハフニウムを用いた Hf-STJ 検出器の衛星搭載実験用観測装置開発を行っており、可視光レーザーで光応答信号を検出することに成功している。衛星搭載実験を 2022 年頃に実施するための検出器製作を 2021 年に開始する。

全研究期間を通して、勉強会、グループミーティング、研究会等を行って、情報交換を通して知識の向上をはかるとともに、検出器開発の計画を練り上げる。研究成果を物理学会・国際会議等で報告し、会議での議論・情報交換を通して検出器開発の推進に反映させる。

⑧ 社会的価値

本研究計画では衛星実験による宇宙背景ニュートリノ崩壊探索が本実験であり、その予備実験としてロケット実験を行う。この宇宙背景ニュートリノ崩壊が検出できれば、ニュートリノの質量自体を決定できると同時に、標準宇宙理論で予言されている宇宙背景ニュートリノの発見となる。この 2 つは素粒子物理と宇宙物理で緊急に解決すべき宿題であり、これが解決すれば、宇宙起源と進化の理解を深め、人類共有の科学の知の基盤を強化し、あらゆる分野の科学に大きな影響を与える。

この実験に用いるために開発している超伝導赤外線検出器は高エネルギー分解能光子検出器として、非常に多くの用途があり、他分野での応用が期待できる。たとえば X 線検出に用いれば、物質科学、生命科学の分野で放射光を用いた実験研究において高エネルギー分解能 X 線検出器として大いに活用されることが期待される。また赤外線一光子検出が可能であることを利用して量子情報通信分野での応用も期待される。これらの応用は経済的・産業的価値を生み出す。

⑨ 本計画に関する連絡先

金 信弘(筑波大学・数理物質系)

暗黒物質の直接探索(XMASS)

① 計画の概要

宇宙の物質・エネルギーの95%は未知である。27%は暗黒物質と呼ばれ、重力の効果に基づいた観測により確実に存在することが分っている一方正体はいまだに不明である。暗黒物質は新たな素粒子と考えられており、それを確認することは現代の物理において大きな意義を持つ。本計画は液体キセノンを用いて、暗黒物質が検出器内で反応した時に放出される蛍光を捉え直接観測する。計画されている検出器は世界最大であるとともに、暗黒物質探索のための検出器としては世界で最も低いエネルギーまで感度を持つ。本検出器は、暗黒物質の最も有力な候補であるWIMPsとよばれる素粒子のみならず、axionやhidden photonと呼ばれる一連の粒子にも感度があり、多様な暗黒物質候補に関して探索を行う事ができる。いずれについても世界最高感度の探索を行い、暗黒物質の同定を目指す。総重量6トン、有効質量3トンの液体キセノンを用い、近い将来にも世界最高感度であるWIMPsと核子との散乱断面積 $1-3 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ までの探索を行う。

暗黒物質探索に必要なもう一つの要素は、低バックグラウンドの実現である。そのために液体キセノン中の自然放射能（クリプトン等）や検出器内面の自然放射能の低減に最新の技術を投入する。クリプトンは、我々の開発した世界最高性能を持つ蒸留塔を用いて低減する。検出器内面の自然放射能は、それらを高い効率で同定できる新型光センサーを用いること、新しく開発された放射性不純物の低い素材を用いること、装置の建設を低バックグラウンド環境で行うことで大きく抑制する。

なお本検出器は低エネルギー太陽ニュートリノの計測を低統計ながら開始し、多目的検出器の実現を目指す。関連したニュートリノの性質に関する研究も期待される。さらに本提案研究は数十トンを超えるより感度の高い、より多目的な検出器の実現に発展させることができる。

② 目的と実施内容

本計画の目的は、暗黒物質を発見し、さらにはその性質について知見を深めることにある。暗黒物質は身の回りの物質と希に衝突を起こし、エネルギーを付与すると期待されている。本計画では、およそ6トンのキセノンガスを液化し、その周りを光センサーで取り囲む検出器を建設し、そこから得られるデータに暗黒物質が衝突した証拠が含まれているかどうか解析を行う。従って研究計画は二つの時期にわけられる。前半の時期は検出器の設計、製作、建設を行う。一旦建設が完了すれば、予備データや校正の為のデータを取得し、検出器の振る舞いを理解し、運転を開始する。後半の時期は、運転を行いながらデータを取得し、平行してデータの解析を行う。データの解析方法は主として二通り考えられる。一つ目は、できるだけノイズを除去したデータを用いる方法である。比較的大きめのエネルギーを付与するような、重い暗黒物質や、電子を強く跳ね飛ばすような種類の暗黒物質の高感度探索を行う。ここではノイズを上回る信号が見られるかの判定を行うことにより、より高感度の探索が可能となる。二つ目は、ノイズの除去は最低限のものとし、できるだけエネルギー付与の小さい信号も逃さず、暗黒物質に特徴的な年間を通じた時間変動を観測する方法である。これまでの経験を踏まえながら研究を実施して行く。

③ 学術的な意義

暗黒物質の正体の解明は、宇宙に関する未解決の問題の中で最も重要な問題の一つである。既知の粒子では暗黒物質の説明ができず、その正体は未知の素粒子だと考えられている。まず未知の素粒子としての暗黒物質の存在を証明することは高い優先度で進められるべきものの一つであり、それは素粒子物理学の発展に大きなインパクトを与える。一旦検出が開始できれば、素粒子としての性質の情報が得られる。また、宇宙論や宇宙物理学で仮定されている暗黒物質の直接的証明を与え、それらの研究分野の基礎を実験的に確認することになる。そのため本計画のような直接検出の方法には強い期待が持たれ、世界的な競争が激しく、本計画の推進は高い緊急度を持つ。

暗黒物質の探索では、宇宙空間や太陽内部などでの反応から発生する宇宙線やニュートリノの観測から間接的にとらえる試みもある。暗黒物質の候補を粒子加速器で生成する方法も推進されている。これらに対して直接検出手法は、例えばキセノンの同位体組成等を変えて暗黒物質の性質を研究

できることや、暗黒物質の候補となる粒子が加速器で発見された場合にその粒子が実際に暗黒物質を形成していることを確認

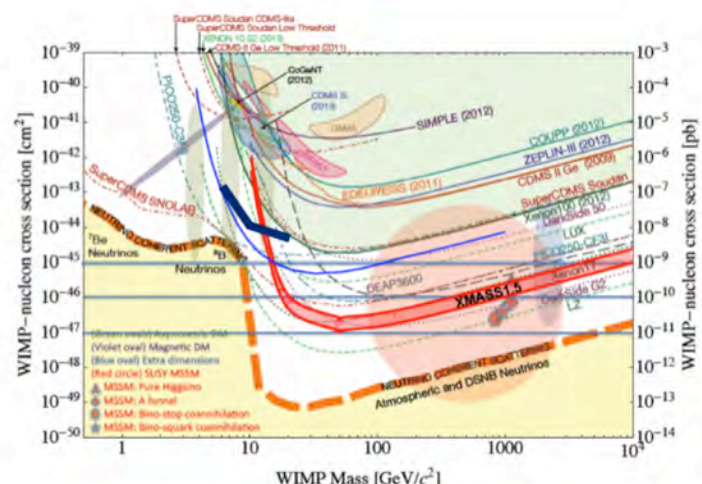


図 1 本提案の探索感度を赤いバンドで示す。黒い太線は時間変動の観測による感度を示す。縦軸は暗黒物質と核子の散乱断面積、横軸は暗黒物質の質量を示す。本文②を参照のこと。

するためにも、意義が大きい。暗黒物質天文学の創成に繋がる可能性がある。

本検出器は小さいエネルギー付与を検出できるため、原子核反跳を生じる WIMP 探索においては探索できる質量の範囲が広い。電子に直接エネルギーを付与する様々な暗黒物質候補にも高い感度がある。他にも低エネルギーニュートリノの計測を開始できること、二重電子捕獲現象の観測を通じて原子核分野への寄与が出来る可能性や、超新星からのニュートリノを検出できる可能性など、多目的検出器としての守備範囲は広く、高いオリジナリティを持つ。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

暗黒物質の探索は国際的な競争である。現在、LUX グループが得た上限値 $6 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$ が最高感度である。XENON グループは XENON1T 検出器を 2016 年～17 年頃に運転開始予定で、数年をかけて $2 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ までの感度を達成することを予定している。本計画は 3 トンの液体キセノンを経典とし 2020 年頃に完成し $1-3 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ までの感度を目標とする。これらの実験により、理論で予想されるかなりの領域を探索できる。さらに本計画では、広い種類の暗黒物質も一気に探索することが可能である。例えば電子を反跳するような暗黒物質の探索感度については、本計画が XENON1T よりも一桁以上優れている。他にも大型の検出器の提案 (LZ 実験等) では、より高い感度を目指している。他に国内で行われている研究は、将来に向けて高感度実験を行うための研究開発である。国内において現時点では本計画だけが高感度の探索を実行できるものである。

⑤ 実施機関と実施体制

本計画の主たる実行機関は東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(以下、IPMU)と東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設(以下、神岡施設)である。IPMU の暗黒物質探索のグループは、岐阜県にある IPMU の神岡分室で研究活動を推進する。現時点でも、IPMU の神岡分室では、神岡施設の維持管理する地下実験室において、暗黒物質探索の研究を推進している。本計画においては IPMU と神岡施設は密接な連携関係を持ち、本計画を推進する中心実行組織をなす。他の国内研究機関は、東海大学、宮城教育大学、横浜国立大学、名古屋大学、神戸大学、徳島大学を含み、それぞれ個性に応じて、実験研究の個々の部分を担当する。海外機関にあつては、韓国の KRISS と IBS が研究組織に含まれる。

データ解析にあつても、実データの基礎的な取り扱いや較正のレベルにおいては、IPMU と神岡施設が中心的な役割を果たすが、暗黒物質探索は全研究者が関与するところとなる。

現時点では、組織は小さく、総数で 40 名弱のメンバーである。しかし、実際に建設が開始されれば、国内・海外のメンバーを増強し、さらに強力に研究を推進できる体制を形成する予定である。

⑥ 所要経費

総重量 6 トン、有効質量 3 トンの建設と運営に必要な経費は総額 3080 百万円である。主たる経費は、キセノン、光センサー、それをハンドリングする容器・配管・低温設備に用いられる。各々 1240 百万円、600 百万円、620 百万円である。光センサーは本計画の主要な改良点であり、準備実験で用いた光センサーとは異なるものとなる。キセノンは、すでに 2 トンが手元にあり、追加に 4.7 トンのキセノンを購入する。この設備には準備実験で用いた設備を有効活用する。光センサーを保持する低バックグラウンドのホルダーに 220 百万円、追加の電子回路、計算機やモニターに 170 百万円が必要となる。その他全体の建設等に 130 百万円が必要となる。

研究を効率よく推進するために特任教員に 75 百万円、安全監視員に 25 百万円が必要となる。

⑦ 年次計画

平成 29 年度：検出器のデザインを完了させる。光センサーの生産を開始する。キセノンと電子回路モジュールの入手を行う。ガス配管、安全対策用の全体の詳細設計を完了する。

平成 30 年度：検出器のデザインを元に容器及び光センサーを保持するホルダーの製造を開始する。光センサーの生産を進める。キセノンと電子回路モジュールの入手を行う。ガスハンドリング系を建設し、検出器とのつなぎこみ部まで製作する。

平成 31 年度：容器及びホルダーの製造を完了する。光センサーの生産を完了し、設置作業に入る。キセノンを全量購入完了する。独立にガスハンドリング系の試運転を行い、キセノンの純化のための蒸留を行う。

平成 32 年度：建設を完了し運転を開始する。検出器の校正等を進める。初期データの解析を進め、それに基づく暗黒物質の候補である WIMPs の証拠を得るか、制限を与える。axion 等の擬スカラー粒子、hidden photon 等ベクトル粒子等の未知粒子の探索を進める。他にも得られたデータの中に期待と異なる振舞いをするものが無いかどうか探索を行う。

平成 33 年度：運転を継続する。データに季節変動がないか、エネルギー依存性がないかを調査する。前年に継続して暗黒物質の証拠、そのほか未知粒子の存在を示唆するデータ、未知の現象、天体現象との相関等がないかどうか調査する。

⑧ 社会的価値

宇宙がどのように発生して、どのように発展してきたか、宇宙は何で出来ているかといった研究は、広く国民に興味を持たれている。現在の宇宙論や宇宙構造形成に関わる学問分野の中では、星の誕生から銀河の誕生まで、宇宙の構造形成の源は暗黒物質だとされている。ただし、暗黒物質が何ものであるか、本当に素粒子であるかといったことが未解決なままに残されている。このような状況の下、暗黒物質がたしかに実験室でも捉えられる事が分かりその正体の解明を進めることができれば、学問的意義のみならず、宇宙観や人間が認識している物質への意識にまで大きな影響を与えられ考えられる。これらは「宇宙を知りたい」という国民の要求に応えるばかりでなく、人類の宇宙観にまで影響を持つものである。

本計画においては、国民の理解を促進するためにも、積極的に新聞等のマスコミに対して情報を開示してゆく。

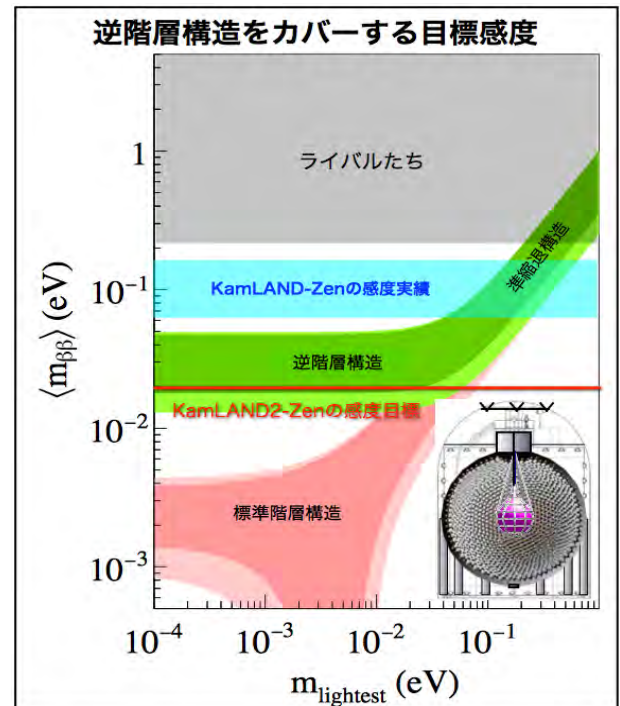
⑨ 本計画に関する連絡先

森山 茂栄(東京大学宇宙線研究所)

極低放射能環境でのニュートリノ研究

① 計画の概要

ニュートリノがマヨラナ質量機構によって質量を得ていることの検証によって、「宇宙に反物質が無く物質だけでできている謎」、「ニュートリノが軽い質量を持つ謎」の解明が期待される。ニュートリノ観測装置カムランドの極低放射能環境を最大限に活用したカムランド禅は熾烈な競争の中で世界を大きくリードする感度を実現してきた。さらにカムランドのエネルギー分解能の向上によって、未踏の逆階層構造をカバーする感度を得ることができ、学術的意義を大きく高めることができる。本計画では、エネルギー分解能向上のためのカムランドの改造を行い、それに同期して極低放射能環境の汎用化を行うことで、暗黒物質探索などの地下素核研究の発展に大きく貢献する。同時に耐久性を高めることで、ニュートリノ地球科学を長期にわたって推進し、超新星ニュートリノのネットワーク観測や重力波との同期観測など天体・宇宙物理の発展にも貢献する。本計画は実績のある東北大学ニュートリノ科学研究センターを中心として国際共同で実施する。基盤となる技術開発や実測に基づくバックグラウンドの理解は完了しているほか、革新的な技術開発や詳細な地球モデルの開発、極低放射能コミュニティの形成など広範な実績を上げており、万全な準備状況である。



② 目的と実施内容

カムランドのエネルギー分解能を大幅に向上し、1400kgの二重 β 崩壊核 Xe136 を導入して、ニュートリノ質量の逆階層構造をカバーするマヨラナ有効質量 20meV の感度でのニュートリノを伴わない二重 β 崩壊（以下 $0\nu 2\beta$ ）の探索を行う。さらに、世界最高精度での地球ニュートリノ観測により、地球の形成・ダイナミクスの理解を深めるニュートリノ地球科学を推進する。また、導入口拡大や外水槽内の機器設置スペース新造により極低放射能環境の汎用性を高め、極低放射能科学を推進する。

高量子効率の光センサーを使用して集光ミラーを取り付け、大発光量の液体シンチレータに置換することで、エネルギー分解能は2倍程度向上する。同時にバルーンを置換し、液体シンチレータ純下装置も新型対応に増強することで、さらなる極低放射能化を図る。また、上部導入口を直径2mの大口径に拡大して重量物つり下げ機構を設置するとともに、外水槽内に機器設置スペースを新造し、多様な極低放射能科学研究に対応する。

③ 学術的な意義

$0\nu 2\beta$ の発見はニュートリノのマヨラナ性を証明し、シーソー機構による「軽いニュートリノ質量の謎」、レプトジェネシス理論による「宇宙物質優勢の謎」の究明につながる。同時にマヨラナ有効質量も測定でき、2乗差しか知られていないニュートリノ質量の大きさを解明できる。これらは、CP位相の測定と併せてニュートリノ研究の最重要課題である。

もし未発見でも学術的な意義が高い必要がある。逆階層構造にも感度を持つことで、宇宙観測などでの比較的重いニュートリノ質量の示唆との矛盾が明確になれば、ニュートリノはディラック粒子と結論できる。あるいは、多くの理論が期待するマヨラナ性を信用すれば、ニュートリノ質量は標準階層構造を持つと結論できる。また、世界をリードする地球ニュートリノ観測を並行して推進できるので、地球始原隕石の特定やマンツルの対流様式といった地球科学の難題を決着できる可能性がある。そこで必要となる地球モデルの精密化も並行して実施する。さらには、NaI結晶を使った過去の暗黒物質探索で見られた季節変動の検証（KamLAND-PICO）や、複数のニュートリノ実験が示



唆する第4世代ニュートリノの精密検証 (IsoDAR) も計画しており、幅広い学術的な成果が期待される。

ニュートリノ研究は主として素粒子分野の課題であるが、宇宙物質優勢を作る宇宙初期の研究にも波及するほか、二重 β 崩壊での核行列要素の測定や計算などでは原子核分野との高レベルでの連携が期待できる。さらに、地球ニュートリノ観測や地球モデルの構築は地球科学分野に波及するものであり、超新星ニュートリノのネットワーク観測や重力波との同期観測などによって天文分野へも波及効果が期待できる。また本計画が構築する極低放射能環境は新たに極低放射能科学分野を開拓する。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

$0\nu2\beta$ 探索は、その重要性から熾烈な競争状態にある。本計画は多目的・極低放射能・高いスケラビリティが特徴であり、世界をリードするこれまでの実績も含めて $0\nu2\beta$ 発見に最も近いといえる。本計画が $0\nu2\beta$ を発見すれば、他実験は必要規模を特定でき、 $0\nu2\beta$ に特化しても成果を保証できる。他核種での測定や角分布の測定は、理論誤差低減や背景物理特定に有効であり、発見から詳細調査への一連の流れとなる。また、カムランドが開拓した地球ニュートリノ観測は新たな実験の参入もあるが、原子炉の稼働率が低いこともあり最も質の高いデータを与える。さらに、多地点測定はより詳細な地球内部情報をもたらすと期待される。カムランドは極低放射能環境の構築においても世界をリードしており、ニュートリノのマヨラナ性研究・ニュートリノ地球科学を含む極低放射能科学研究のパイオニアかつ基盤的研究としてその発展が期待される。

⑤ 実施機関と実施体制

東北大学ニュートリノ科学研究センターを中心として、国内から東京大学 Kavli 数物連携宇宙研究機構、大阪大学大学院理学研究科、徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部、国外からは、ローレンスバークレー国立研究所、カリフォルニア大学バークレー校、ワシントン大学、マサチューセッツ工科大学、テネシー大学、ハワイ大学、TUNL、デューク大学、ノースカロライナ中央大学、Nikhef、アムステルダム大学が参加し、KamLAND (地球ニュートリノ観測ほか)、KamLAND-Zen ($0\nu2\beta$ 探索)、KamLAND-PICO (暗黒物質季節変動検証)、IsoDAR (第4世代ニュートリノ探索) の国際共同研究グループの連携で運営する。

⑥ 所要経費

- 高エネルギー分解能化：(大光量液体シンチレータ、高量子効率光センサー、集光ミラー) 1億円
- 汎用化：(導入口拡張+クレーン設置+外水槽内機器スペース新造) 1億円
- 極低放射能環境の増強：(低放射能バルーン、デッドタイムフリー電子回路、革新技術開発、液体シンチレータ純化装置増強) 8億円
- 二重 β 崩壊核の増量：(Xe136 追加 600kg) 9億円
- 人件費：8年間で3億円 (ニュートリノ科学研究センター運営費充当分以外)
- 運営費：8年間で1億円 (ニュートリノ科学研究センター運営費充当分以外)
- 合計 37億円 (ニュートリノ科学研究センター運営費充当分以外)

⑦ 年次計画

初年度：カムランド改修/デッドタイムフリー電子回路導入/地球ニュートリノ観測開始 (以降継続)

第二年度：高分解能でのニュートリノデータ取得開始/低放射能ミニバルーン製作/キセノン調達・純化

第三年度：キセノン含有液体シンチレータ導入/ $0\nu2\beta$ 探索開始/革新技術開発 (発光フィルム、高感度撮像装置など)

第四年度以降 (5年間)：20meV の感度での $0\nu2\beta$ 探索/革新技術開発

- ・ $0\nu2\beta$ 探索は、20meV の感度に達するには5年の観測期間が必要である。
- ・第4世代ニュートリノ探索を行う IsoDAR 実験は、地下にサイクロトロンを設置するためその準備研究を継続して行う。
- ・暗黒物質の季節変動の検証は KamLAND-PICO 計画での NaI 開発に合わせて、外水槽内・カムランド内での研究を順次進める。検証には2年の観測期間が必要である。
- ・超新星ネットワーク観測や重力波との同期観測は他のものと競合しないで継続して進める。

⑧ 社会的価値

「無から生じた宇宙になぜ我々は存在できるのか？」といった基本的な謎への挑戦は、国民の知的好奇心をかき立て、理科離れが進む現状に歯止めをかける一助になると期待する。また、ニュートリノ研究において日本が世界をリードしている状況を堅持することは、最先端で活躍できる環境として教育・人材育成への高い効果が期待できる。本研究は、宇宙・素粒子の大問題としてよく取り上げられる「宇宙物質優勢」、「暗黒物質」、「暗黒エネルギー」、「軽いニュートリノ質量」のうち3つに関連しており、知的価値は非常に高いといえる。

⑨ 本計画に関する連絡先

井上 邦雄 (東北大学ニュートリノ科学研究センター)

光子ビームによるクォーク核物理研究計画

① 計画の概要

光子ビームによるクォーク核物理研究を推進し、量子色力学 (QCD) 真空とハドロン内のクォーク相関を究明する。本計画は、共同利用・共同研究拠点である東北大学 ELPH (電子光理学研究拠点) と大阪大学 RCNP (サブアトム科学科学研究拠点) との拠点間連携研究計画である。その特徴は、両拠点の持ち味を有機的に結合することによって初めて切り拓かれる研究を独創的かつ包括的に推進すると共に、そのための研究手段を飛躍的に改善し開拓するものである。

RCNP が SPring-8 で共同利用に供するレーザー電子光 (LEPS/LEPS2) ビームは 100% 偏極の世界最高性能を誇るレーザー電子光であり、このビームラインに設置した 4 π 電磁カロリメータ BGOegg は GeV 領域で世界最高エネルギー分解能を持つ ELPH の基幹検出器である。BGOegg は、拠点間連携協力により震災復興期間中に既に SPring-8/LEPS2 に移設し稼働し始めており、本研究前半の主要検出器としての役割を担っている。クォーク核物理の研究においては、質量の異なるフレーバーを研究対象とするために数百 MeV から数 GeV の広い範囲のエネルギー領域で包括的な研究を進めることが必要である。このために、両拠点がそれぞれ共同利用に供する光子ビームのエネルギーギャップを埋め、500MeV から 3GeV までの連続エネルギーの光子ビームを共同運用する。また、本研究後半の主要検出器として米国ブルックヘブン国立研究所から移設した大型ソレノイド電磁石を中心とする検出器を建設する。さらに、次期計画に繋がる世界初の 8GeV 単色光子ビームを開拓する。

② 目的と実施内容

本研究の目的は、レーザー電子光ビームを用いて萌芽したペンタクォーク粒子 Θ^+ を始めとする様々な研究成果を踏まえ、ハドロン構造の研究を更に掘り下げると共に QCD 真空を探究することである。そして、我が国におけるクォーク核物理の研究環境を飛躍的に改善し、この分野の国際拠点となることを目指す。

この研究を推進するために、1) SPring-8 のレーザー電子光ビームライン LEPS 及び LEPS2 の高度化を企図し、蓄積電子の時間構造と同調するレーザーを開発してビーム強度の増強を図る。更にこの技術を短波長レーザーに適用し光子ビームのエネルギーを上げる。レーザーに関する運転・調整・改良のためにスタッフが常駐する。一方、1GeV 領域の高強度エネルギー標識化光子ビームを共同利用に供する ELPH では、1.3GeV シンクロトロン的高度化によって、0.5GeV 付近の光子ビームの改良・安定供給を図り、0.5GeV から 1.2GeV までの低エネルギー領域におけるクォーク核物理を推進する。2) LEPS2 における、米国ブルックヘブン国立研究所より移設・設置した直径 5m、総重量 400 トンの 1 Tesla ソレノイド磁石を用いた大型汎用検出器の建設を進める。3) 電子ビームの高度化により超短パルス電子ビームを開拓し、これを用いて 8GeV 単色光子ビームの実現を目指す。

③ 学術的な意義

クォーク核物理研究は、ハドロンを研究対象とする非摂動領域 QCD 現象の研究であり、難解で時間を要す。しかし、物質の質量の 99.9% はハドロンが担っており、その 99% は QCD におけるカイラル対称性の自発的破れによって創成されると考えられており、学術的観点からはこの複雑な階層の研究は避けて通れない。実際、格子 QCD による核力の導出など、理論面での画期的進展と並行して、エキゾチックハドロン探索に見られるように実験的研究が精力的に進められている。このような状況の中で、本計画では、二つの特徴ある拠点が連携することによって得られる利点を活かしたクォーク核物理研究を推進する。

ハドロン構造の研究は、究極的にはクォークによって物質がどのように形成されるかを解明することを目的とする。現在の知見によれば、陽子ですら単純な 3 クォーク状態ではなく、5 クォーク等の高次の成分を含んでいる。例えば 2 クォーク (ダイクォーク) があたかも一つの自由度を形成して、2 つのダイクォークと 1 つの反クォークで 5 クォーク状態が形成される描像が提案されている。このような観点から、少なくとも 5 つのクォークで構成されるペンタクォークバリオン等のエキゾチックハドロンの存在形態を突き止めることは、ハドロン構造研究に突破口を切り拓くことになる。

一方、QCD 真空の研究は、物質がどのように創成されるかに関わる研究である。一般に、ハドロンは非摂動的に決まる QCD 真空の素励起 (粒子は量子場の励起状態) であり、逆に、ハドロンの消滅演算子によって QCD 真空を定義する。即ち、ハドロン構造の研究と QCD 真空の研究は相互規定的であり密接に関係している。

これらの研究に実績がある二つの拠点が連携することによって、クォーク核物理研究を飛躍的に推進し、世界をリードする包括的な研究拠点を形成することができる。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本研究分野においては、まず国内では、稼働中の J-PARC ハドロン実験施設における研究がある。J-PARC ではハドロンビームが用いられ、主にチャームクォークを含むハドロンの構造の研究が進められると期待される。本研究計画では、研究対象のフレーバーは u, d, s クォークであり、かつ光子ビームとハドロンビームによる研究は互いに相補的である。

光子ビームを用いた研究は、米国のジェファークソン研究所 (JLab) で行われている。特に現在進行中のアップグレード計画が完了すると、GeV エネルギー領域の偏光した光子ビームが生成できるようになるが、ダイヤモンド結晶を用いて偏光させるため偏光度は 40% 程度である。偏光方向の切り替えの容易さの点から見ても本計画の方が圧倒的に優れている。また X 線の逆コンプトン散乱による 8GeV 単色光子ビームが開発されれば、他の追従を全く許さない。

⑤ 実施機関と実施体制

東北大学電子光物理学研究センター（電子光物理学研究拠点）、大阪大学核物理研究センター（サブアトム科学科学拠点）

- 電子ビームの高度化・高機能化、単色光子ビーム開発
電子光物理学研究センター加速器ビーム物理研究部
高輝度光科学研究センター加速器部門
- 荷電粒子スペクトロメータ建設
核物理研究センター核物理研究部、理研
京都大学理学研究科物理学専攻
- 4ビームライン運転・維持・改良
電子光物理学研究センター核物理研究部
核物理研究センター核物理研究部
電子光物理学研究センター加速器研究部
- レーザー電子光ビームの高度化・高機能化
電子光物理学研究センター核物理研究部
核物理研究センター核物理研究部
- LEPS2 電磁カロリメータ開発
電子光物理学研究センター核物理研究部
核物理研究センター核物理研究部、理研
- データ収集システムの構築
電子光物理学研究センター核物理研究部
台湾中央研究院物理研究所、岐阜大学教育学部

⑥ 所要経費

本研究計画においては、両拠点が運営する4つの光子ビームラインを共同運用して進められる。従って、研究のインフラストラクチャーは整っている。必要な研究経費の主なものはLEPS2 検出器と8GeV 単色光子ビームの開発費である。LEPS2 検出器は、米国ブルックヘブン国立研究所より移設・設置した直径5m、総重量400 トンの1 Tesla ソレノイド磁石内に設置する電磁カロリメータ、及び荷電粒子スペクトロメータである。研究の前半で使用されるBGOegg は、LEPS2 検出器が完成した後はLEPS で使用する。

光子ビームによるクォーク核物理研究推進 32億円

(内訳)

- 荷電粒子スペクトロメータ建設 5億円
- 電磁カロリメータ建設 5億円
- 電子ビーム高度化・単色光子ビーム開発 16億円
- 4ビームライン運転・維持・改良経費 4億円
- 運営費 2億円

⑦ 年次計画

本研究計画は平成28年度から6年間の計画として立案する。各種測定器建設は最初の2年までに終え、残りの4年で最大の成果をあげる。平成25年から既存の検出器を用いて準備研究を開始している。ELPH とSPRing-8 (LEPS/LEPS2) の2カ所で連携して研究を推進する。

○ 平成28年度

・上半期は、LEPS2 で電磁カロリメータ BGOegg を中心とする検出器を用いてデータ収集を続行する。下半期からは、荷電粒子スペクトロメータ、及びガンマ線検出器を大型ソレノイド電磁石内に装着する。並行して隣のビームラインLEPS で Θ^+ に関するデータを蓄積する。・ELPH：電磁カロリメータ FOREST を改造し、前方0度の荷電粒子検出装置を建設する。

○ 平成29年度

・LEPS2：大型ソレノイド内荷電粒子スペクトロメータ、及びガンマ線検出器のテストデータを収集する。電磁カロリメータ BGOegg にPW0 前方電磁カロリメータを装着して、ハドロンの精密電磁崩壊事象測定を目指す。・LEPS2/LEPS：レーザー電子光ビームの高度化を図り、蓄積電子の時間構造と同調するレーザーを開発する。・ELPH：改造した FOREST によるデータ収集を開始する。・電子ビーム高度化：単色光子ビーム開発に向け、フェムト秒電子バンチ実現を目指す。また、X-FELO の研究を進める。

○ 平成30年度以降

平成29年度までに各種検出器の建設を終了し、30年度から本格的データ収集に入る。

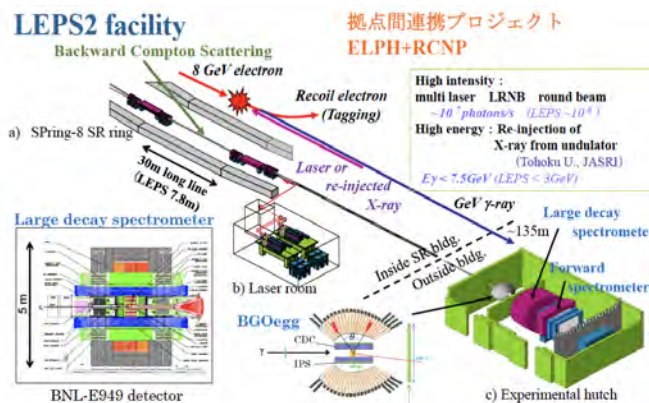
⑧ 社会的価値

物質とは何か真空とは何かを探索する学術的研究は、人類共通の疑問に対する答えを求めるもので、人類の知の創造の一翼を担う。この観点からすれば、先ず第一にこのような学術的研究自体が社会的・文化的意義を持つ。更に、既に述べたように本研究のような実験によって未踏領域を切り拓く研究では、常に最先端の実験技術や測定器材料の開拓が必要であり、これらは関連企業を通して社会との連携の下で進められる。そこで開発された新技術は長期的には人類の日常生活に応用される。例えば、今回の計画では、複数のビームラインで様々な実験セットアップを変えながら実験を行うために、実験条件や規模の変化に柔軟に対応できる使いやすい回路システムを構築する。このような技術は、今や豊かで安全な社会の発展のために欠くことができない衛星の設計に応用され始めている。

本研究は国際共同研究である。それは、異なる習慣や宗教を乗り越えて行われる共同作業であり、国際性豊かな人材育成に資するものである。そして、我が国がこのような場を提供していることは、国際社会における信頼と尊敬を受けることに繋がる。

⑨ 本計画に関する連絡先

清水 肇（東北大学・電子光物理学研究センター）



高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ相の解明

① 計画の概要

我々を取り巻くハドロン物質は、超高温高密度の極限状況下では、ハドロン内部にあるクォークが閉じ込めから解放され、クォークとグルーオンからなるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)に転移する。このQGPを実験的に生成する唯一の手法が高エネルギー重イオン衝突である。本研究は、RHIC 加速器(米国 BNL 研究所)および LHC 加速器(CERN 研究所)の二大重イオン加速器を駆使して、高エネルギー重イオン衝突実験を国際協力の下で推進し、QGP の物性(輸送特性、状態方程式、QGP 生成機構)やハドロンやクォークでできた QCD 物質の相構造(臨界点、クロスオーバー・一次相転移)を温度や密度の関数のもとに明らかにし、極初期宇宙のような高温状態から中性子星内部のような高密度状態にいたるまでの極限状態における物質の存在形態とその性質に関する新たな知見の獲得を目指す。

本計画では、3つの研究班(LHC 班、RHIC 班、J-PARC 班)を立ち上げる。LHC 班と RHIC 班は、高温領域における QGP の物性科学を展開する。日本グループが参与してきた RHIC-PHENIX 実験と LHC-ALICE 実験において、現状では測定が困難なジェットや重クォーク、光子・レプトンの高精度測定を目指し、主要測定装置の高度化や新規建設、大容量データ処理システムの強化を行う。RHIC 班と J-PARC 班は、高密度領域における QCD 相構造の研究を推進する。この研究に最適な RHIC-STAR 実験に新たに参加する。高密度領域の QCD 相構造を精密に検証する高輝度重イオン実験を J-PARC で実施することを目指し、加速器と実験装置の基礎開発研究を行う。

② 目的と実施内容

本研究計画は大別して2つに分けられる。1つ目は LHC-ALICE 実験と RHIC-PHENIX 実験による高温 QGP の物性研究である。LHC-ALICE/RHIC-PHENIX 実験にて重イオン衝突実験・物理データ解析を推進すると同時に、精密研究を可能とする LHC-ALICE 実験高度化や RHIC-sPHENIX 新実験の建設を遂行する。ALICE 実験高度化では、中央飛跡ガス検出器・前方シリコン飛跡検出器・カロリメータ検出器・計算機グリッドシステムの製作・設置・運用を主導する。sPHENIX 実験では、中央シリコン飛跡検出器の製作・設置・運用を担当する。ALICE 実験高度化を 2020 年に、sPHENIX 実験を 2022 年に完成させ、これまでに十分な精度で測ることのできなかった新しい測定量を測ることで、QGP 物性の温度依存性や QGP の生成機構を明らかにする。

2つ目は、QCD 物質の相構造の解明に向けた、RHIC の衝突エネルギー走査実験の遂行と J-PARC での重イオン加速を目指す基礎研究である。RHIC-STAR 実験に新たに参加することで、2019-2020 年に行われる衝突エネルギー走査実験・物理データ解析を主導し、臨界点や相転移現象、相境界を探索する。QCD 物質の相構造研究のさらなる精密化には大きなビーム輝度が不可欠である。そのためには世界最高出力を誇る J-PARC 加速器で重イオン加速を行う必要があり、その基礎研究を行う。

本計画の物理成果を最大にすべく、国内の研究機関を集約し、国外の研究機関や関連する他分野研究との有機的な連携・協力を可能とする研究基盤を整備する。また、国際共同実験を最前線で牽引すべく、CERN 研究所などに海外研究拠点を設立する。

③ 学術的な意義

QGP は、高温高密度下で実現し、多くのクォークやグルーオンが互いに相互作用することによって特異な性質が発現する創発性に富む新しい物質である。極限状況下で姿を見せる様々な臨界・相転移現象(超電導や超流動など)と同様に、QGP の性質や QCD 物質の相構造を解明することで、強い相互作用に支配された系のもつ普遍的性質を明らかにする。

超高温 QGP はビッグバンによる宇宙開闢直後の宇宙の姿である。QGP の性質研究は、「初期宇宙の物質構造と宇宙創成のシナリオ」を明らかにする。QGP は、クォークがハドロンの閉じ込めから解放され、裸の質量を持つ相(カイラル対称性の回復)である。QCD の基本問題である「クォークの閉じ込め・ハドロンの質量獲得」という「物質生成と質量の謎」を明らかにする。高密度側においては、臨界点や一次相転移境界があることが予想されているが、理論的確定は困難を極め、実験に期待がかかる。高密度側における QGP の性質や QCD 物質の相構造を明らかにすることで、中性子星などの高密度星の内部構造も明らかになる。

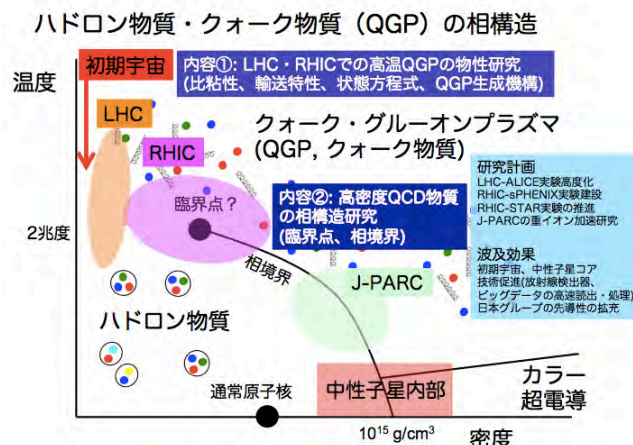
QGP が持つ流体的な性質は QGP が非常に強く結合した系であることを示す。強結合系という横糸で、半導体中の高密度電子ホール系や超低温度フェルミガス系+AdS/CFT 対応理論を含んだ、原子核物理と物性物理を融合した新領域の創生に繋がる。

高エネルギー重イオン衝突は衝突直後に、世界最強の電磁場や非線形な QCD カラー電磁場を生成する。これらの動力学を理解することは、高強度電磁場による高エネルギー宇宙線生成・加速機構、超高強度レーザー実験において多光子が関与する電磁場の非線形挙動の理解につながり、QED・QCD の非線形・非平衡系物理に大きな発展をもたらす。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

高エネルギー重イオン衝突による QGP 物性や QCD 物質の相構造研究は、原子核物理における最も重要な研究の一つである。

高エネルギー重イオン実験に参加する多くの国際研究機関が、QGP 物性の精密研究を最重要課題と考えている。



RHIC-PHENIX/LHC-ALICE 実験とも、精密研究を可能にする実験高度化を進め、2020 年頃に新たな実験開始を予定している。

RHIC-PHENIX 実験や LHC-ALICE 実験では、測定器建設から物理解析にいたるまで日本グループの寄与は非常に大きく、この高度化計画にも大きな貢献が期待されている。日本グループは、これまでの経験を基に、主要な測定器建設や物理解析用計算機の強化を担う。また、QCD 物質の相構造研究に対しては、これまでの日本グループの経験を RHIC-STAR 実験で発揮することが期待されている。RHIC-STAR 実験とともに高密度核物質の研究手段として、J-PARC における重イオン実験も検討されている。J-PARC での重イオン実験に期待する声が、国内外の多くの理論、実験研究者から上がっている。

⑤ 実施機関と実施体制

大型国際共同実験 (RHIC-PHENIX/RHIC-STAR/LHC-ALICE 実験) を長期かつ主導的に行うにあたり、研究基盤組織の形成は必須である。筑波大学に設立され、同大学が行っている素粒子・原子核・宇宙分野が連携した「数理物質融合科学センター」を本研究母体とする。本センターの一部門を担う高エネルギー重イオングループが研究全体を牽引し、国内研究機関や関連分野と連携し研究基盤を形成する。また、CERN 研究所に当センターの海外研究拠点を設置し、最前線にて関連研究を推進する。

本研究は、筑波大学を中心に、筑波大学・東京大学・広島大学・理化学研究所・奈良女子大学・長崎総合科学大学・J-PARC センターを研究遂行機関、大阪大学核物理研究センターを研究協力機関として遂行する。

本研究では、3 つの研究班 (LHC 班、RHIC 班、J-PARC 班) を設置する。LHC 班は筑波大学を筆頭に、東京大学・広島大学・長崎総合科学大学が実施機関となる。LHC-ALICE 実験高度化には、東京大学と長崎総合科学大学が中央ガス飛跡検出器の高度化を、広島大学はカロリメータ強化と前方シリコン飛跡検出器の建設を、筑波大学は前方カロリメータやグリッド計算機システムの強化を担当する。RHIC 班は sPHENIX 実験の建設と STAR 実験での研究を展開する。理化学研究所を中心に、筑波大学・奈良女子大学が実施機関となる。sPHENIX 実験におけるシリコン飛跡検出器の建設を理化学研究所と奈良女子大が主導し、STAR 実験での衝突反応面検出器の建設や実験遂行を筑波大学が主導する。J-PARC 班は、J-PARC における重イオン実験の実現に向けて、実験課題の具体的な提案を行い、またそれを可能にする加速器や測定器の開発研究を進める。

⑥ 所要経費

本研究は H28-H38 年の 10 年間に亘って進められる。総額は 37 億円程度であり、以下の 4 種に分類される。

1 つは RHIC-PHENIX/RHIC-STAR/LHC-ALICE 実験の遂行・運営費と国内外における研究拠点の設置・運営費である。研究者の雇用、海外研究における旅費・滞在費も含め、1 億円/年を計画する。

2 つ目は LHC-ALICE 実験高度化用の検出器の製作と設置である。中央飛跡ガス検出器と大容量データの高速読み出し回路、前方のシリコン飛跡検出器、前方の電磁カロリメータの製作と建設を進める。製作・建設に 16 億円を見込む。

3 つ目は RHIC-sPHENIX 実験用の新測定器建設費である。日本グループが責務を担うシリコン飛跡検出器の開発や製作に 8.5 億円を計画する。RHIC-STAR 実験では衝突反応面検出器の製作と建設に責務を持し、この製作に 0.5 億円を見込む。

4 つ目は、J-PARC における重イオン加速や重イオン実験に向けた基礎研究である。加速器についてはイオン源、リニアック、ブースターの開発、実験についてはデータ収集系や各種測定器の開発に 2 億円の研究費を見込む。

⑦ 年次計画

本計画の実施期間は、H28 年 (2016) から H38 年 (2026) の 10 年間である。

LHC 班は、LHC-ALICE 実験におけるデータ取得と物理データ解析 (2016-2020) に加え、高精度のジェット・重クォーク・光子・レプトン測定を可能にする ALICE 実験高度化を遂行する (2016-2020)。ガス電子増幅器を使った中央飛跡ガス検出器、大容量データの高速処理回路、前方シリコン飛跡検出器の製作を主導する。また、前方カロリメータの製作・導入を行う (2020-2026)。2020 年以降の ALICE 実験高度化を用いて、クォーク物性科学を強力に推進する (2020-2026)。

RHIC 班は、RHIC-PHENIX 実験の物理データ解析と並行して、2022 年から始まる sPHENIX 実験に向けたシリコン飛跡検出器の製作を遂行する (2016-2022)。2022 年以降の sPHENIX 実験におけるジェットや重クォークの高精度測定を通じて RHIC エネルギーの QGP 物性研究を展開する。RHIC-STAR 実験に 2016 年から参加する。衝突反応面検出器を製作し (2017-2018)、2019-2020 年に行われる衝突エネルギー走査実験を完遂し、QCD 物質の相構造研究を展開する (2019-2026)。

J-PARC 班は、重イオン加速に向けた基礎研究を進め、加速器と実験装置の設計・計画案を 2017 年までに策定する。

QGP の物性科学を展開する国内研究拠点や CERN 研究所などに海外研究拠点を設置し、最前線基地として関連研究を推進する。

⑧ 社会的価値

日本グループが主導してきた RHIC-PHENIX 実験では、高温 QGP に関する学術成果を、記者発表を通じて国民へ発信してきた。

高温高密度という極限状況下で顕在する QGP は、ビッグバンから始まる宇宙開闢直後の物質の姿として大いに国民の関心を得ており、また固体・液体・気体・プラズマに次ぐ新しい物質状態として、私たちの物質観に非常に重要な知的価値を与える。

新技術を基にした測定器開発は、汎用的・特殊用途的な放射線計測技術の発展に繋がる。シリコン検出器や放射線ガス検出器の開発は、各種放射線測定機器、放射線治療機器、非破壊検査機器の技術促進に繋がる。大容量データの高速読出・処理系の開発は、高解像度の高速イメージング、ロボット工学、自動自動車運転技術などの IT 分野に多大な発展をもたらす。

J-PARC のような世界最高強度の重イオン加速器の開発は加速器科学の発展と国内の加速器科学者の育成のために重要である。

国際共同実験、海外拠点における研究活動を通じて、国際的に活躍できる若手研究者を輩出する点も重要である。

⑨ 本計画に関する連絡先

三明 康郎 (筑波大学本部)

RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進

① 計画の概要

理化学研究所「RI ビームファクトリー」(RIBF) は2007年の稼働開始以降、世界最高強度のRI ビームを供給し、魔法数の異常性の発見など、数多くの成果を上げている。また宇宙重元素合成過程(r -過程)研究においても、これまで取得が不可能だった実験データを大量に蓄積し、革命的な状況を生み出している。

本計画ではRIBFを高度化し、現状のRI ビームをさらに大強度にすることにより、「RI ビームを用いた新同位元素生成」を可能とする。これにより現施設では到達できない超ウラン元素の中性子過剰領域にまで研究範囲を拡大する。RIBFで端緒を開いた魔法数研究と r -過程研究の領域を大きく拡大するとともに、超重元素領域で魔法数を二つもつ「安定の島」に到達する方法を探索する。

超重元素研究では、熱い融合反応を利用して中性子過剰な領域の119番を超える超重元素の発見を目指す。これらの未知元素の探索には本提案で実現する大強度一次ビームが必須である。これらの超重元素は「安定の島」近傍に位置するため、その寿命等の測定を通じ、この領域の魔法数効果を調べることが可能となる。

本計画の高度化を欧米並で建設中の次世代RI ビーム施設が性能を発揮しはじめる2025年頃に完了させることにより原子核物理学における我が国の先導的地位をさらに高めたい。

本計画は、日本の原子核研究を代表する四機関、理研、阪大核物理研究センター、KEK素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター、東大原子核科学研究センターが有機的に連携し、研究を推進する。四機関合同の運営体制を構築し、国際評価委員会、国際研究課題採択委員会などを通じて、研究計画の議論・立案を行い、国際的学術コミュニティと緊密な連携をもって計画を推進する。

② 目的と実施内容

理研現有の重イオン加速器施設を高度化し、強力な一次ビームによる大強度RI ビームを供給して、当該分野における日本の先導的役割を飛躍的に発展させる。この強力な加速器インフラを活用し魔法数研究、元素合成研究、核反応研究を中性子過剰な超ウラン重元素領域まで拡大する。加速器施設の高度化の内訳は以下の通りである。

- 1) 2段目のリングサイクロトロン fRC を超伝導リングサイクロトロン New-fRC に置き換え、初段の荷電変換装置を省く。
- 2) 初段のリングサイクロトロン RRC の高周波系を更新して加速電圧を上げ、大強度化の障害となっている空間電荷効果を低減させる。
- 3) 既存のSRCのRF系の増強およびBigRIPSの放射線遮蔽の強化を行う。
- 4) 超伝導加速空洞を導入して超重元素の生成効率を上げる。

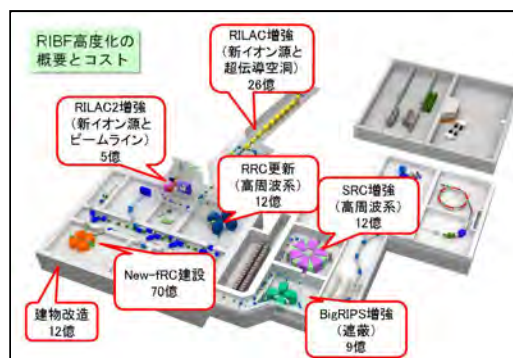
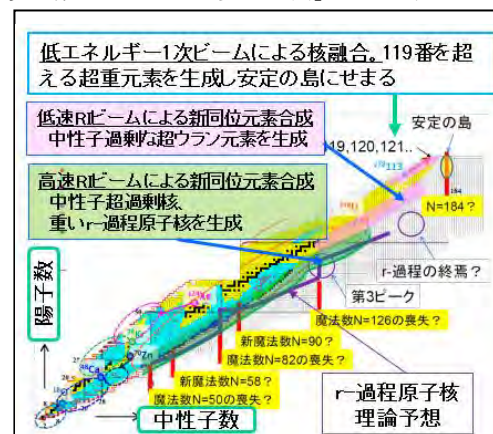
1) - 4) の整備により現在の一次ビーム強度の30倍増を見込んでいる。強化された低エネルギー一次ビームにより119番を超える超重元素の発見研究を進める。また、強化された高速一次ビームを用い、中性子超過剰な重原子核を生成し、既存の実験施設を利用して分光や反応研究を進める。

③ 学術的な意義

RIBFは原子核物理学の新時代を拓いている。中重核領域までの中性子超過剰核を生成し、新現象の発見と新しい原子核描像の構築、宇宙での重元素合成過程(r -過程)研究などを推進し、多くの優れた成果を上げている。これまでに魔法数の異常性、新奇ハロー核、テトラ中性子などが発見され、これら特異な性質は、中性子過剰核の弱束縛性に加え、多体力効果によると指摘されている。 r -過程については、これまでの天文観測や理論を基盤とした研究から、実験データによる定量的な議論へと進展しつつあり、革命的な状況を生み出している。本計画では中性子スキンなど特異な性質を持つ中性子過剰核を大強度RI ビームとして用いる核反応により、未開拓な領域の同位元素を生成する「RI ビームを用いた新同位元素生成」を提案する。これにより中性子過剰領域を超ウラン元素まで開拓することができ、RIBFで端緒を開いた魔法数研究と r -過程研究を拡大して、重い中性子過剰核を包含する新しい原子核描像の構築と r -過程の全貌解明に向けて飛躍的に研究を発展させる。また、超重元素領域で魔法数を二つもつ「安定の島」に到達する反応法を探索する。

本計画で拡大する中性子過剰核をガンマ線分光や精密測定などを利用して調べ、中性子数 $N=58, 90$ での新魔法数探索、 $N=50, 82, 126$ の魔法数の健全性を調べ、 r -過程に関連する核データの取得、中性子捕獲反応、核分裂研究などを展開する。

113番元素発見により日本初の命名権を獲得した超重元素研究は、熱い融合反応を利用して中性子過剰な領域の119番を超える超重元素の発見を目指す。これらの超重元素研究により「安定の島」に迫り、魔法数効果を調べることが可能となる。



④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

2007 年より本格始動した RIBF は、2016 年現在、世界の他施設の 100～1000 倍以上の RI ビーム生成能力を誇っている。一方欧米垂では現 RIBF 施設を越える性能を目指して新施設の建設が進んでいる。

RI ビームを供給できる施設としては、In-flight 型と ISOL 型に大別される。欧米で建設されている CERN・HIE-ISOLDE やフランス・SPIRAL2 は ISOL 型で、RI ビームの最大エネルギーは核子当たり 5MeV 程度であり、また強度は RI 元素の化学的性質に大きく依存する。In-flight 型では米国・FRIB、ドイツ・FAIR が挙げられ、核子当たり数 100MeV のビームが供給できる。RIBF は In-flight 型の施設であり、すべての元素の RI を供給できることに加え、本計画の高度化により核子あたり 5～20MeV 程度の低速 RI ビームや超低速 RI ビーム（全エネルギーで 30keV 以下）を強化する。これにより、強度では世界に匹敵し、エネルギー範囲では世界を遥かに凌駕する RI ビームの利用を可能にし、引き続き原子核物理学分野で世界を先導することができる。

⑤ 実施機関と実施体制

国立研究開発法人理化学研究所仁科加速器研究センターは本計画の全体に関わる基盤整備および研究立案の責任を担う。国内外の関連研究機関・大学との連携体制を構築し、本計画を推進する。現在の RIBF 研究施設の運営法を踏襲し、国際評価委員会、国際研究課題採択委員会などを通じて、研究計画の議論・立案を行い、国際的学術コミュニティと緊密な連携をもって計画を推進する。本計画を共同提案する阪大核物理研究センター、KEK 素粒子原子核研究所、東大原子核科学研究センターとの間で四者協議会を発足させ、責任を明確に分掌した計画の実施・運営を進める。

阪大は次世代高分解能ガンマ線検出器の開発を担当する。重元素領域の分光研究には必要不可欠の検出器であり、安定の島近傍核を含む不安定核の核分光研究を展開する。その実現のため、理研・仁科センターと相互に分室を開設し、強い連携のもと国内外の研究コミュニティのイニシアチブをとる。

KEK 素核研は理研・仁科センターとの連携研究のもと、本計画で高度化を行う元素選択型質量分離器(KISS)を RIBF に設置している。2014 年には KEK 和光原子核科学センターを開設し、KISS 実験プログラム全体の運営を担当している。さらに超低速 RI 生成装置(SLOWRI)を含む超低速短寿命核供給施設全般の高度化を担当し、重元素領域の精密核分光を展開する。

東大原子核科学研究センターは 2000 年よりその活動の拠点を理研和光キャンパスに置いて活動しており、高分解能スペクトロメータ SHARAQ、低エネルギー RI ビーム生成装置 CRIB を RIBF に設置、既に多くの成果を上げている。ビームイオン源や加速器高度化においても理研との共同運営を行って来た。本計画においては、特に RI ビーム減速器を開発・設置し、世界的にも未開拓なエネルギー領域の RI ビームを供給、これによる研究を推進する。

⑥ 所要経費

本計画では、既存の RIBF 加速器入射系に超伝導加速器（超伝導リングサイクロトロンおよび超伝導線形加速器）を新設することによって一次ビームの強度の増強を図る。ビーム強度の増強に伴い、既存の RIBF 加速器の高周波系と、RI ビーム生成分離装置の放射線遮蔽の増強が必要である。【理研担当分】総額（初期投資）：146 億円、【連携研究機関担当分】総額（初期投資）：40 億円

⑦ 年次計画

本計画は、欧米垂で建設中の次世代 RI ビーム施設が性能を発揮しはじめる 2025 年頃に完成させる予定である。これにより、日本の加速器施設が、世界の原子核物理学研究を引き続き先導することとなる。さらに本計画では、低速 RI ビームを利用した新しいプログラムを展開することにより、未知の研究領域を開拓する。理研は 2006 年に世界で初めて超伝導リングサイクロトロン（SRC）を完成させた。今回新設するサイクロトロンにもその開発経験を活かす。また、超重元素生成用に導入する超伝導線形加速器の設計はほぼ終了しており、要素技術開発も順調に進んでいる。大強度 RI ビーム発生系の標的・遮蔽および既存加速器の高周波系の改造・更新についても設計方針が確定しており、年次計画通りに高度化を行う目途が立っている。

⑧ 社会的価値

2015 年大晦日に発表した 113 番元素命名権獲得の報は日本国民に広く祝福された大ニュースとなった。日本の基礎科学における金字塔であり、原子核研究にたいする国民の理解が飛躍的に高まった。本計画によって 119 番を超える新元素の発見を行い国民の付託に応えたい。この加速器増強は、アスタチン等の特殊な核医薬品応用の道も開く。

社会応用面においては、原子核研究は原子力研究の根本的な基礎基盤を担うものである。2011 年の東日本大震災で起こった福島原子力発電所の事故は、原子核基礎研究を推進しているコミュニティの社会貢献を再考する契機となった。現在、放射性廃棄物の減容を目指した長寿命核分裂片の反応研究を進めており、本計画では、マイナーアクチノイド等の減容に向けた基礎研究を行う。

また、物性プローブとしての RI 利用も拡大する。多様な RI ビームの利用により、高温超電導や薄膜といった物性・材料科学等との幅広い学際的融合研究が期待できる。これら基礎研究の学際的、社会的、産業的効果は非常に大きい。

これまでに引き続き、重イオン育種研究を展開する。桜の名所、寄居の夏桜は理研 RIBF で生まれた仁科乙女である。

⑨ 本計画に関する連絡先

延興 秀人（理化学研究所・仁科加速器研究センター）