

EIC 計画及びこれに関連する原子核物理学の 新たな展開に関する中間報告

令和 6 年 7 月 19 日
EIC 計画及びこれに関連する
原子核物理学の新たな展開に
関する有識者会議

1. はじめに

量子科学技術を量子コンピュータや新たなエネルギー源として幅広く応用するには、量子系のコヒーレンスと制御性の両立や、外部環境との相関を考慮に入れた量子開放系の挙動等、量子に関する未解明な学理に対する理解を深め、量子系の能動的制御を可能にすることが必要であり、原子核物理学、情報学、数学等の幅広い分野の研究コミュニティが連携して取り組むことが求められる。

そのため、「量子産業の創出・発展に向けた推進方策」（令和 6 年 4 月 量子技術イノベーション会議決定）及び「統合イノベーション戦略 2024」（同年 6 月 閣議決定）において、量子科学技術の基礎学理を探究する大学・研究機関等の研究体制を抜本的に強化するとともに、人材育成を進めることが重要とされたところである。

一方、EIC 計画は、米国エネルギー省（DOE）が進める、核子（陽子と中性子）のスピンや質量の起源解明を通じて、量子とエネルギーに関わる根源的な理解を目指す原子核物理学分野の国際共同プロジェクトである。世界初の偏極電子と偏極陽子・原子核の衝突型加速器（Electron-Ion Collider, EIC）の建設準備が、米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）において、2026 年の建設開始、2034 年の本格運転開始に向けて進められている。2022 年には国際共同実験グループが設立され、我が国を含む 25 の国や地域から 850 名以上の研究者等が参加している。

本年 2 月、DOE から、文部科学省に対して、EIC 計画に参加する我が国の大学・研究機関への支援の要請があったところである。

こうした状況を踏まえ、EIC 計画への我が国の大学・研究機関の参画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開について、専門的見地から検討を行うため、本会議が本年 5 月に設置された。本報告書は、本年 5 月から 7 月まで計 3 回にわたり開催された本会議での議論を中間報告としてとりまとめたものである。

2. 我が国の原子核物理学の現状と課題

原子核物理学は、物質の創成と進化の解明を目指し、量子色力学（Quantum Chromodynamics, QCD）を基礎理論、素粒子（クォークとグルーオン）を基本単位として、核子（約 10^{-15}m ）から中性子星（約 10^4m ）までの広い階層の量子ダイナミクスを研究する学問である。原子核物理学の振興により、科学的価値に加えて、イノベーションの創出、エネルギーの安定供給、人材育成への貢献が期待されている。

- ① 宇宙における物質の創成と進化を理解するための基礎科学
 - ・ 素粒子⇒陽子/中性子⇒原子核⇒（重）元素の形成過程の解明
 - ・ 核子の質量・スピン等の基本的な性質の起源の解明
 - ・ 量子、エネルギーの基礎科学、量子アドバンテージの実証

- ② 産業、医療、その他の応用を通じてイノベーション創出に貢献
 - ・ 産業：材料開発、半導体ソフトエラー、非破壊検査、品種改良等
 - ・ 医療：がんやアルツハイマー病の診断・治療等
- ③ 原子力の基礎科学として、将来のエネルギーの安定供給に貢献
- ④ これらに関連する人材育成

そのため、我が国においても、RI ビームファクトリー（RIBF）、大強度陽子加速器施設（J-PARC）及び大阪大学核物理研究センター（RCNP）等の大型実験施設の整備や、米国 BNL での相対論的重イオン衝突型加速器（RHIC）による PHENIX 実験、欧州原子核研究機構（CERN）での大型ハドロン衝突型加速器（LHC）による ALICE 実験等の国際共同実験への参画を通じて、不安定核・ハイパー核やクォーク・グルーオン・プラズマ等の研究で優れた成果を創出するとともに、理論研究においても、京や富岳等のスーパーコンピュータによる量子色力学の数値計算での核子間の相互作用（核力）の導出等の優れた成果を創出してきている。

また、我が国の若手研究者が、LHC-ALICE 実験や RHIC-STAR 実験等において、国際共同研究を主導する研究ポストを獲得し活躍するとともに、本分野を志す大学院生の数も近年増加している。

一方で、本分野の我が国の研究者数は減少傾向にあるとともに、我が国の原子核物理学関係の論文数や TOP10%論文数も減少傾向にあり、このままの傾向が続けば、研究体制は脆弱となり、研究力も衰退していくことが危惧されている。

原子核物理学分野の重要性や、本分野に対する我が国のこれまでの貢献等に鑑みれば、今後とも我が国において本分野を振興していくことにより、科学的な発見のみならず、応用面からもその波及効果が期待できる。そのため、本分野の国際共同大型実験計画である EIC 計画への参画をひとつの契機として、多くの学生や若手研究者を惹きつけ、本分野への参加を促すような研究環境の整備や独創的な研究成果を創出し、その成果を他分野や実用化に向けて波及させていくことを目的として、本分野の研究開発を戦略的に進めていく必要があり、今後の我が国の原子核物理学が目指す方向性を具体化することが重要である。

3. EIC 計画への我が国の参画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開

EIC 計画への参画を契機とした、我が国の原子核物理学の新たな展開について、EIC 日本グループの研究者をはじめとした、原子核物理学の研究者から以下のような方向性が提案された。

（１）今後の我が国の原子核物理学が目指す方向性

- ① 原子核物理学を起点とした、日本発・主導の新たな学問領域の創成
 - ・ 量子物理学は、クォーク・核子・原子核、原子・分子、凝縮系（液体・固体）、天体・宇宙の各階層に適用されて、それぞれの階層での理解が進んできた。一方、連星中性子星合体からの重力波・電磁波放出、物質中における量子もつれの定量化、強相関電子系における高温超伝導の発現やその輸送現象（スピンや電荷の流れ）等、各階層の理解だけでは解決できない問題が山積しており、複数の階層にわたる理解が不可欠となっている。
 - ・ 原子核物理学は、物質の創成と進化の解明を目指し、量子色力学を基礎理論、素粒子

を基本単位として、核子から中性子星での広い階層の量子ダイナミクスを研究する学問である。

- このような特性を有する原子核物理学を起点として、理論、実験、計算科学を融合したアプローチにより、様々な階層を超える量子ダイナミクスの普遍的な法則の解明を目的とする「マルチスケール量子ダイナミクス研究」の創出を目指す。
- 具体的には、以下の事例のように、原子核物理学の概念・理論・数理・実験手法・技術を階層横断的に活用することで、様々な階層の量子多体系に対して、根源的な概念や法則性を与えることが期待される。

原子核物理学	他の階層への展開
原子核反応機構の解明	非平衡量子系の普遍的性質の抽出
格子 QCD 第一原理計算による核力の解明	量子多体系の動的構造形成への応用
ハドロンやクォーク・グルーオン物質の内部構造解明	非摂動効果が本質的な役割を果たす強相関量子多体系への応用
ハドロン多体系からクォーク・グルーオン多体系への相転移の解明	相転移現象の普遍的性質の抽出
QCD におけるトポロジカル現象の解明	原子・分子や電子系におけるトポロジカル量子物質への応用

- 「マルチスケール量子ダイナミクス研究」創出による、原子核物理学の振興により、その科学的意義に加え、社会に直接的な影響を与える分野への貢献が期待される。具体的には、以下のような貢献が見込まれる。
 - 医療分野への応用：原子核物理学の知見を活用することで、がんやアルツハイマー病の診断・治療等の医療技術の発展に寄与する。
 - 産業界へのイノベーション創出：原子核物理学の研究を通じて開発された先端技術や分析手法は、材料開発、量子情報、非破壊検査、品種改良等の幅広い産業分野に応用可能であり、イノベーションの創出に貢献する。
 - 将来のエネルギーの安定供給：原子核物理学は、核融合等の次世代エネルギー技術の基礎となる学問であり、その発展は将来のエネルギーの安定供給に不可欠である。
 - 人材育成：原子核物理学の研究を通じて、高度な専門知識と俯瞰力を有する人材が育成される。これらの人材は、幅広い分野で活躍することが期待される。

② エネルギー分野のイノベーションへの貢献

(エネルギー変換の根源的理解)

- 核子・原子核の質量の約 99%はクォークとグルーオンの量子色力学的な相互作用（量子ダイナミクス）と、質量とエネルギーの等価性 ($E=mc^2$) から生じている。核子・原子核の 3 次元的内部構造（クォークとグルーオンの空間分布や運動量分布）に関する実験と理論を通じてクォークとグルーオンの量子ダイナミクスを明らかにすることで、核子・原子核の質量の起源を解明できる。
- 宇宙に存在する重元素は、超新星爆発や連星中性子星合体など極限的な環境下で進行する連鎖的な核融合や核分裂から生まれたと考えられている。この連鎖反応の中間過

程に現れる自然界には存在しない多様な原子核を実験室で生成し、その原子核反応過程を理論的に明らかにすることは、多様な原子核反応におけるエネルギー変換過程の統一的な解明に繋がる。

- 通常の原子核物質からクォーク・グルーオン物質（宇宙初期や中性子内部などの極限環境下で現れる物質）への状態変化は、クォークとグルーオンの量子ダイナミクスから生じている。実験室において、高温クォーク・グルーオン・プラズマ、高密度クォーク物質、カラーガラス凝縮（高エネルギーの核子・原子核内部に現れる高密度グルーオン状態）を生成し、それらの性質を明らかにすることは、極限状態における物質の状態変化とエネルギー変換機構の解明に繋がる。

（エネルギー分野との連携・波及）

- 核融合プラズマとクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）は、いずれも粒子と波が複雑に非線形相互作用する多体系であり、基礎方程式の数学的構造やその解法において共通する理論的基盤がある。
- QGP 研究では、重イオン衝突実験におけるプラズマ生成、プラズマの時空発展、そして観測量に至るまでを記述する統合シミュレーションの研究が進んでいる。核融合プラズマにおいても、核融合を伴いながら安定的に稼働する核融合炉開発には、核融合プラズマの統合シミュレーションが重要となる。また、従来の重水素-三重水素反応を超える先進燃料核融合反応（陽子-ホウ素反応等）の正確な理解には、原子核物理学における最先端の核反応計算手法が有用である。これら計算手法やシミュレーション手法に関する情報共有により、核融合プラズマ研究とQGP研究の相乗的発展が期待できる。
- 核融合炉開発と原子核物理実験は、超伝導マグネット、センシング、ビッグデータ処理等、要素技術や分析手法が共通であり、相乗効果による発展（核融合プラズマのモニタリング、核融合炉の高性能化・安全性向上への貢献）が期待できる。
- 理論・実験の両面で原子核物理学と核融合科学の研究交流・連携研究・人材交流を進め、広い意味でのエネルギー分野の研究を新たなフェーズに導くことで、イノベーションにつながる基礎学理の創出に繋がる。

③ 量子分野のイノベーションへの貢献

（量子ダイナミクスの根源的理解）

- 原子核物理学では、原子核にハイペロン（ストレンジクォークを含む粒子）を埋め込んだハイパー核や QGP 中で生成される重いクォークなどのプローブと環境の相互作用を通じて量子系の根源的理解を目指す研究が進んでいる。これらは、物質科学における不純物をプローブとした量子ダイナミクス研究や、量子コンピュータ開発における量子ビットと外部環境の相互作用等と概念的に密接に関連しており、階層を超えて普遍的な量子コヒーレンス・デコヒーレンス機構の解明に貢献できる。
- 重イオン衝突における原子核物質から QGP への相変化や、中性子星内部での原子核物質からクォーク物質への相変化は、様々な環境下で物質が構造変化を行う量子ダイナミクスの解明に繋がるもので、階層を越えて、電子系、磁性体、冷却原子など物性科学に現れる相転移現象と共通性・普遍性があると考えられる。
- QCD におけるトポロジー（位相幾何学）が関係する量子効果（例えば、重イオン衝突におけるカイラル磁気効果（磁場の方向に電流が流れる効果））の研究は、物性物理学における新奇な磁性体研究やトポロジカル物質（例えば、ワイル半金属）の研究と密接に

関連しており、量子物質の普遍的理解に大きく貢献すると考えられる。

(量子分野との連携・波及)

- スーパーコンピュータ開発に QCD のモンテカルロ計算（確率的数値計算）がベンチマークとして大きく貢献してきたように、QCD における挑戦的課題（時間依存ダイナミクス、高密度クォーク物質など）を量子コンピュータを用いて解決しようとするアプローチや、原子核構造・反応を量子コンピュータを用いて解くアプローチは、最先端の量子計算アルゴリズム開発を促進し、量子アドバンテージ（量子デバイスが古典コンピュータよりも速く問題を解決できること）の実証に貢献すると期待できる。
- 量子コンピュータ科学の促進に、最先端の量子科学と計算科学の知識を有する原子核物理学の研究者が即戦力として貢献できる可能性が高い。特に、外部からのノイズにさらされている量子コンピュータが意味のある演算を実行するために本質的な誤り訂正機能については、QCD を始めとする量子ゲージ理論の知見が新たな視点をもたらす可能性がある。
- 原子核実験で必要となる大規模データ処理を高速で行う目的で、量子コンピュータの活用が今後進む可能性がある。逆に、量子コンピュータ自体のスケラビリティ向上のためのモジュール化や量子通信と古典通信のハイブリッドシステムの構築には、原子核実験で研究が進んでいるストリーミング型データ収集システムの概念や基盤技術が示唆を与える可能性がある。
- 冷却原子・分子の量子もつれ状態を用いた電子の電気双極子モーメント測定等、原子核物理の実験では極めて高い精度のセンシング技術が必要とされており、原子核物理の実験を通じて、新たな量子センサー等の量子技術の開発に貢献する。
- 共同研究や人材の流動等を通じて、原子核物理と量子分野の研究を新たなフェーズで融合して、量子分野のイノベーションにつながる基礎学理の創出が期待できる。

(2) 原子核物理学の新たな展開における EIC 計画の位置付け

① EIC 計画の概要

- EIC は、DOE 傘下の BNL に建設を予定する、世界初の偏極電子と偏極陽子・原子核の衝突型加速器（全周約 3.8 km）である。
- 電子を陽子または原子核と大強度で衝突させることにより、内部構造の精密な測定を行うことで、原子核の新たな描像、陽子の質量とスピンの起源解明等の科学的成果と新たなエネルギー源の開拓や量子コンピュータの実現等の広範な応用が期待される。
- EIC の建設費は、現時点で約 17 億～28 億ドル（約 2,700 億円～4,400 億円）で、日本は実験データの測定に使う検出器などの開発を担う予定。2026 年に建設開始、2034 年に本格運転開始を予定。

② EIC で期待される科学的成果

- 原子核物理学における最重要課題のひとつが核子・原子核内部のクォークとグルーオン構造の解明。EIC は、解像度、時間分解能、強度の観点から人類が手にする「究極のフェムトスケール電子顕微鏡」となる。EIC の目標は、1 次元的な情報しか得られなかったこれまでの実験から大きく飛躍し、核子・原子核内部の 3 次元構造（クォーク・グルーオンの空間分布や運動量分布）を実験的に解明する。

- これにより、陽子の質量とスピンの起源を解明する（陽子の質量の約 99%はクォークとグルーオンの量子エネルギーや核子の周りの真空構造の変化に由来すると考えられている。また、陽子のスピンへのクォークのスピンによる寄与は 3 割程度であり、グルーオンのスピンやクォークとグルーオンの軌道角運動量が大部分を占めると考えられている。）
- QCD の非線形性（グルーオンの自己相互作用）に由来する創発的量子現象である QCD 真空の構造（クォークの閉じ込め（クォークを単独で取り出すことができない現象）やカイラル対称性（クォークの質量がゼロの時に成り立つ対称性）の破れ）やカラーガラス凝縮を解明する。

③ EIC の科学的成果の波及

- 計算科学（古典、量子）への波及効果：EIC で生成される核子・原子核の構造に関する実験データの理論的解釈にむけた QCD の大規模モンテカルロ計算や量子計算のアルゴリズム開発の進展により、次世代スーパーコンピュータや量子コンピュータの開発、量子古典ハイブリッド計算手法の開発に波及する。
- 核融合科学への波及効果：EIC で測定される高エネルギーのクォークとグルーオンや重いクォークと核媒質の相互作用の解明は、核融合炉における α 粒子加熱（高エネルギー粒子とプラズマの相互作用）など、階層は異なるが共通の物理的背景をもつ現象の理解を促進する。
- 物質科学への波及効果：高エネルギーの核子・原子核の内部に出現するカラーガラス凝縮の本質的理解は、階層をこえて、物性科学における新奇な物質状態の研究に波及する可能性がある。
- 宇宙物理学への波及効果：EIC による核子・原子核の 3 次元構造（クォークとグルーオンの空間分布と運動量分布）を解明することで、宇宙初期の QGP が冷却して核子や原子核が生成される詳細な機構や、中性子星内部で核子が融解しクォーク物質が生成される機構など、宇宙における原子核の創生と終焉の理解が進展すると期待できる。

④ マルチスケール量子ダイナミクス研究への EIC の貢献

- 量子強靱性：非線形・強結合で量子性の強い QCD ダイナミクスにより、安定な核子がクォークとグルーオンから自己組織化される機構の解明は、物質科学や量子計算科学における安定した量子性を持つ物質の探索や量子コヒーレンスの保持に関する研究開発に貢献する。
- 量子多体系の創発ダイナミクス：核子の 3 次元構造の解明を手がかりに、クォークとグルーオンから核子、原子核、中性子星などの階層が創発する普遍的機構を解明することは、原子分子科学、化学、物質科学を経て巨視的スケールの階層構造が自然界に生まれる共通の論理を探る基盤となる。
- 量子開放系の非平衡現象：EIC において測定される高エネルギー粒子や重いクォークの伝搬は、環境（原子核や真空）と接触してエネルギー等のやりとりを行う非平衡開放現象と捉えることで、その研究は環境との相互作用に伴う量子デコヒーレンスの機構解明に貢献する。

⑤ 我が国の戦略

- 日本グループは、国際共同実験である ePIC (Electron-Proton/Ion Collider) 実験に参加し、我が国の強みである半導体技術とデータ収集技術を活かして、以下の測定器・システムを担当予定（実験を主導するポストは獲得）。
 - T0F：粒子を同定する高時間分解能センサー

核子・原子核の内部構造の測定には、クォークの種類を同定することが必要。先行実験(ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)の電子・陽子円形加速器(HERA))よりも格段に優れた粒子同定用の測定器を設置し、EIC が初めて高精度で粒子同定を行う。
 - ZDC：事象を判別する高空間分解能の半導体センサー

核子内部のクォークとグルーオンの空間分布を測定するには、最前方方向（陽子や原子核の進行方向）に散乱される陽子や中性子のエネルギーを正確に測定することが必要。EIC で初めて高精度で測定されるものであり、EIC で最も重要な測定器である。
 - DAQ：スケーラビリティのある「ビッグデータ収集×リアルタイム高度解析」システム

ePIC 実験では、毎秒 50 万回の衝突が起こる。測定器から出力される総データレートは 400Tbps に達し、これらのデータをすべて収集する。収集したデータを、ハードウェア加速演算装置と AI 技術を使って遅延なくリアルタイムで再構成し、反応事象を可視化する。ストリーミング型データ収集システムを採用することで、実験環境や規模の変化に柔軟に対応できるアーキテクチャを実現し、高度なスケーラビリティを獲得する。この新しいシステムを ePIC 実験に実装し、将来の原子核実験のデータ収集システムの世界標準となることを目指す。
- 日本グループは、40 代の研究者を中心に、30 代の多くの研究者と共に、我が国の強みを生かして、計画の成否に関わる重要な上記 3 つを担当し、データ解析と物理成果の創出を主導する。上記 3 つのいずれも純国産の基盤技術を用いており、国際共同実験である ePIC 実験に参加し、実装することで、我が国の基盤技術の国際標準化を目指す。
- 米国からは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が持つ高い加速器技術（クラブ交差等）に対し、加速器本体への協力（金銭ではなく、技術面でのアドバイス等）に強い期待があることから、可能な協力の在り方について、研究者間でのコミュニケーションを継続する。

⑥ 我が国の強みの更なる強化

- 我が国には、低エネルギーの原子核実験施設である RIBF と、中間エネルギーの原子核実験施設である J-PARC があり、国内に一定の研究コミュニティが存在する。
- 従来、エネルギー階層を超える交流は多くはなかったが、EIC は低エネルギーから高エネルギーまでの階層を超えた解析が期待できる装置であることから、EIC 計画への参加を契機として、低エネルギーから中エネルギーまでの RIBF や J-PARC 等での研究を併せて進めることにより、国内の研究コミュニティが一丸となり、クォークとグルーオンの第一原理に基づき、クォーク・核子（ハドロン）・原子核に現れるマルチスケールの量子のダイナミクスを理解することを目指した取組を進める。
- この取組により、階層を超える新たな学理を創出し、量子やエネルギーに関する根源的な理解等、原子核物理学に新たな価値を与える。また、各階層における研究の価値を最大化するとともに、マルチスケール量子ダイナミクス研究の創出に基礎学理からの指針を与える。

⑦ 我が国の産業への波及等

- 最先端の加速器実験は、新たな技術を生み出すとともに、その技術実証の場であり、社会実装前のテストベッドとして加速器実験を活用することは極めて有益である（例えば、CMOS センサーを改良し、100%の検出効率・高放射線耐性・高空間分解能・高時間分解能を持つ CMOS センサーが加速器実験のために開発されている）。
- ePIC 実験に向けて、大量データを取得し、即時データ解析し、理論に基づく大規模計算と比較し、直接見えない核子内部のクォークとグルーオンの 3 次元構造を再構成することを可能とする新たなデータ収集・分析システムを開発する。
- この直接見えないものを可視化する技術は、ナノスケール構造解析等で幅広く応用できる技術であり、それを活用できる人材育成にもつながる。
- データの重要な相関をありのまま伝える「マルチメッセンジャー」としてサイエンスの研究方法を革新し、新たな発見をもたらす可能性を秘めている。また、自動運転等の産業技術への応用も期待でき、我が国が目指すサイバー空間とフィジカル空間が融合した Society 5.0 の実現にも大きく貢献することが期待できる。
- EIC 実験による発見を通じて、核子・原子核を能動的に直接制御することが可能となれば、以下のような革新的な技術が生まれる可能性がある：
 - 核融合反応の制御技術の向上による、安定かつ持続可能な核融合発電の実現
 - 希少元素や同位体の効率的な生成による、新素材や医療用アイソトープの製造
 - 量子状態の精密な制御による、革新的な量子計算技術の開発

(3) EIC 計画の実施体制

① 大学・研究機関等の幅広い分野のコミュニティの連携

- 理研は、BNL に EIC 拠点を整備し、測定器建設やストリーミング型データ収集システムの実装、日本人研究者の受け入れ支援を行う。将来の応用可能性を見据えて、新たな視点で量子物理学を基礎に立ち返って見直す「Fundamental Quantum Science Program (FQSP) (仮称)」を立ち上げた。原子核物理学は FQSP において重要であり、その一部に位置付けて EIC 計画を推進する。
- 大学は、国内のアカデミアの知を集約し、優秀な人材を確保し BNL に派遣するとともに、技術の国際標準化を主導。EIC 計画を推進するクォーク・核物理研究機構を東京大学に本年 7 月に設置。大阪大学核物理研究センター（国際共同利用・共同研究拠点）との大学間連携により、オールジャパンで大型国際研究を推進する体制「国際量子物理ネットワーク拠点」(ネットワーク型国際共同利用・共同研究拠点を目指す)を構築。共同利用・共同研究拠点の機能を活かし、エネルギーや量子などの関連分野も含めた多様な大学・研究機関の参加を促していく。
- 汎用な高速・高効率ストリーミング型データ収集システムを開発するために SPADI Alliance (約 130 人が参加) を強化し、組織的に技術を開発し継承する体制を構築する。
- NPC (Belle II 実験に個人で参加できる仕組み) や SPADI Alliance の取組を参考に、所属組織の規模に関わらず、若手をはじめとする研究者が EIC 計画に柔軟に関われる仕組みを構築する。これにより、EIC と他のプロジェクトとの間で双方向の人材交流が促進され、計画の進捗に応じて研究者が多様な形態で参画できるようになる。

② 関連人材の育成

- 量子技術（量子コンピュータ等）や核融合（フュージョン・エネルギー）の分野は、近年急速に民間の投資が拡大してきたこともあり、研究開発を担う人材の育成や確保が課題となっている。
- 原子核物理学と量子技術・核融合は、学問としての共通性や、用いる技術・装置の共通性が高く、きわめて親和性の高い分野である。
- 原子核物理学と量子技術・核融合の分野の間で、連携して人材育成に取り組み、分野間で人材を流動できるよう、合同での研究者間交流のためのワークショップや若手・大学院生向けのサマースクール等を開催する。

（４） EIC 計画の所要経費

理研と大学（東京大学、大阪大学等）は、以下の経費をその役割に応じて分担して EIC 計画に参画する（運営費交付金のみならず、競争的資金等も活用）。

【建設期】総額約 92 億円

- 建設費 総額約 42 億円（2025-2030 年）
（内 TOF 約 16 億円、ZDC 約 14 億円、DAQ 約 12 億円）
- 運用費 年間約 8 億円（建設期：2025-2030 年）
（内 人件費：約 4 億円、設備費：約 2 億円、その他（旅費、消耗品等）：約 2 億円）

【運用期】総額約 192 億円

- 運用費 年間約 10 億円（運用期：2031-2050 年）
（内 人件費：約 5 億円、設備費：約 1 億円、その他（旅費、消耗品等）：約 4 億円）

※2031 年から調整運転、2034 年から本格運転を開始予定。上記の運用期間は仮のもの。

また、DOE によれば、現時点の建設費の総額 17～28 億ドル（約 2,700 億円～約 4,500 億円）については、概念設計段階であるため幅がある（1 ドル＝160 円換算）。また、加速器に加え、測定器、人件費等の運用費を含むものである。

なお、将来に向けた測定器の高度化のための技術開発を行う予定であるが、それに要する経費は上記に含まれていない。

4. まとめ

（１） EIC 計画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開について

EIC 日本グループの研究者をはじめとした原子核物理学の研究者からの提案を踏まえ、本会議として、EIC 計画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開について、以下のとおり所見をまとめた。

○ 目指す方向性

- 原子核物理学は素粒子・物性・宇宙等のあらゆる分野と結びつきがある現代物理の基本概念が集約された学問であり、量子物理学の概念を広い階層に渡って汎用的に活用するために重要な役割を果たすと考えられる。
- 原子核物理学の研究成果は、エネルギー分野、量子分野等とも関連し、応用分野は

多岐にわたる。

- 原子核物理学の分野で学位を取得した者が、素粒子物理学、天文学、加速器科学等の他の分野で活躍してきており、今後も他分野で活躍することが期待できる。
- 原子核物理学を起点とした、クォーク-原子核-物性-生命-宇宙の階層をまたがる量子ダイナミクスの普遍的な法則の解明を目的とする「マルチスケール量子ダイナミクス研究」の創出を目指す方向性は適切と考えられる。
- 原子核物理学の基礎から医療・産業・エネルギー分野等まで見据えており、原子核物理学分野の研究水準を維持しつつ、分野を超えた研究成果創出や人材の育成が期待できる。
- 米国では量子情報科学に素粒子・原子核物理学を含めて振興しており、我が国でも量子情報科学や核融合分野との連携を戦略的に進めていく必要がある。

○ エネルギー分野への波及等

- 核子の質量の理解は、核融合でエネルギーを生み出す仕組みの根本的な理解につながる。
- 原子核物理学と核融合分野では、理論の数学的構造、実験技術が共通している。共通の課題について協力して研究を進めることで共創的に発展していくことが期待できる。特に、核融合プラズマとクォーク・グルーオン・プラズマには集団現象という共通性があり、どのようにエネルギーや物質の輸送が起きるのが共通の課題である。共通の数学的構造に対するアプローチやシミュレーション手法、データ科学等での協力が考えられる。

○ 量子技術への波及等

- 量子の制御と強靱性をどう両立させるかが技術的なポイントであり、原子核物理学の研究による基礎学理の解明や実験技術の確立が広い意味で量子技術（量子コンピュータ実用化やトポロジカルな量子物質の開発等）に波及すると考えられる。
- 原子核物理学の研究者コミュニティは、既に量子技術・量子情報分野の人材の供給源となっていることから、今後も量子技術の発展を支える人材の供給源になることが期待できる。
- 最も難しい有数量子多体系である原子核物理学で鍛えられた計算手法が、様々な量子多体系を研究する周辺分野の現状を革新する起爆剤になると考えられる。例えば、原子核物理学では異種粒子（ストレンジクォーク等）を含んだ量子多体系の計算手法を確立してきているが、化学等に応用することで新しい現象の解明に貢献することが期待できる。
- 原子・分子の量子的動態の解明には、陽子の内部自由度が重要な役割を果たすことが指摘されており、原子核物理学の知見は、宇宙の物質の理解の根底になると期待できる。

○ EIC 計画

- EIC 計画は、広いエネルギースケールにおいて核子・原子核の 3 次元構造を解明するものである。核子構造の解明は、階層構造の起点の解明であり、クォーク（EIC）、ハドロン（J-PARC）、原子核（RIBF/RCNP）の階層にわたる研究を有機的につなげることで、中性子星の超高密度の極限状態で顕現する新たなハドロン描像の確立等にもつながり、宇宙における物質の創成と終焉についての人類の知見をさらに広げることが期待できる。
- EIC 計画に動機付けされた新しいアイデアによる研究が行われることにより、新しい知見がもたらされることが期待できる。

○ EIC 計画の活用

- EIC 日本グループは、我が国の強みである半導体技術とデータ収集技術を活かして、半導体測定器とデータ収集システムを担当予定であり、我が国の基盤技術（半導体センサー、ストリーミング型データ収集）の国際標準化を進めることが期待できる。
- 我が国の強みが十分に生かされた、研究、教育、人材育成、他分野への波及、産業連携まで視野に入れた計画となっており、我が国の技術や研究成果を活かして科学的に世界をリードするとともに、産業の育成にも貢献することが期待できる。
- 米国からは、我が国の高い加速器技術に対し、EIC の加速器本体への協力にも強い期待があることから、国内のリソースに配慮しつつ、国際共同実験において我が国の技術力の高さと存在感を示す好機として、積極的な貢献ができるよう、研究者間でコミュニケーションを継続していくことが望ましい。

○ EIC 計画への参加体制

- 中心となって推進する研究者の基盤組織を形成し、優秀な人材の確保・育成が必須である。そのためにも、研究拠点と大学の教育組織との強力な連携が必要となる。
- 強力な研究基盤を有する理研と、教育研究組織である東大 QNSI と阪大 RCNP が中核となって構築する国際量子物理ネットワーク型拠点が強力に連携することで、日本の量子物理分野の研究力向上と人材育成による幅広い分野への波及が期待できる。
- これまでの原子核物理学分野での実験の経験を活かした、個人や小規模な体制でも実験に参加できる体制の検討が進められている。

○ 人材育成

- 今後の我が国の研究開発力の強化に向けて、分野を越えた知と人材の共有及びそのための人材育成は重要である。
- EIC 計画の新たな研究環境は、若手研究者や学生を惹きつけ、原子核物理学分野への参加の促進や、将来的に様々な分野・国で活躍できる多様な選択肢を示すことにもなることから、我が国の科学技術や産業の新たな進展に貢献することが期待できる。
- EIC 計画に大学院生が参加できることにより、我が国の若手研究者が国際的に活躍する土台となることが期待できる。また、研究者が個人でも参加できる仕組みにより、我が国全体の若手研究者の国際化や研究力向上につながることを期待できる。

○ 経費

- EIC 計画への参加に必要な経費としては、EIC の総建設費 17 億ドル～28 億ドル（約 2,700 億円～約 4,500 億円）のうち、測定器建設への貢献約 42 億円のほか、人件費、設備費等の運用費が建設期（2025 年～2030 年）に年間約 8 億円で総額約 92 億円、運用期（2031 年～2050 年）に年間約 10 億円で総額 192 億円と見込まれる。本計画への参加を通じて、我が国が得られる科学的成果や人材育成の効果、またそれらによる学際的な波及効果も踏まえれば、費用対効果の高い計画と考えられる。

○ 総合的所見

- 以上を総合的に勘案し、EIC 計画への我が国の大学・研究機関の参画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開を積極的に進めていくため、国内の関連する既存の大型実験施設や大型実験計画等も踏まえつつ、文部科学省が、理化学研究所、東

京大学、大阪大学等の関連する機関や研究者の取組を積極的に支援していくことが必要である。

(2) 今後の留意点

本取組の推進に当たっては、以下の点について留意する必要がある。本会議の最終とりまとめに向けて、今後これらの点について議論を進めていく。

○ 他分野との連携

- 細分化された分野間の壁を低くし、学際的な連携を強化することが必要。そのためには、複数分野に共通する根本的課題について協創的に取り組む体制を構築することが必要。具体的には、計測技術やデータ解析等の方法論のイノベーションをもたらす研究課題を設定し、分野を超えた共同研究を行う仕掛けを構築すること。
- 核融合分野に EIC 計画が重要な貢献をしていくため、分野間のコミュニケーションを通じて共通的な研究課題の定式化に努め、実りある連携を構築すること。
- 原子核物理学の魅力を発信し、他分野との融合的研究を促す仕組みを構築することから、我が国の EIC 計画への技術的貢献を量子技術分野へ横展開していく仕組みを構築すること。

○ 研究推進体制

- EIC 計画の科学的意義を広く周知し、多様な分野の研究者の参画を促進すること、我が国の貢献度を高め、計画における主導的な立場を確立すること。
- 実験結果を解析・解釈するための理論研究も重要であり、理論と実験が連携した研究体制の構築が必要。実験の準備と並行して、理論研究を担う若手を育成していくこと。
- 原子核物理学分野への波及効果を大きくしていくために、EIC を起点として、ハドロンや原子核の各階層の研究もあわせて推進していく計画とすること。
- 医療、産業、エネルギー分野への応用には、低エネルギー領域の研究成果と応用分野とのつながりが重要であるため、人材と情報が活発に交流できる仕組みを構築すること。
- 我が国の大学院生や若手研究者が BNL で研究ができるように、BNL 拠点の体制拡充などを検討すること。

○ 人材育成

- 人材が減少しているのは原子核物理学だけの問題ではなく、物理学全体の問題である。どのように物理学分野に人材を巻き込んでいくかも考えるべき。学生が興味を持てる面白い物理や、多様な分野に進むことができる可能性を示すこと。
- 学生や若手研究者が国内の実験と国際的な大型実験の両方に段階的に参画できる機会を提供し、継続的にスキルアップしていける体制を整備していくこと。
- ダイバーシティの観点で、女性研究者や外国人研究者の参画を促進する仕組みを構築すること。

○ 社会や国民からの支持

- 将来に期待できる計画ではあるが、ある程度の金額・期間を費やすため、社会・国民からの理解・支持を得るための科学コミュニケーションを丁寧に行うこと。
- 適切な評価を実施すること。

EIC 計画及び同計画による我が国の原子核物理学の
新たな展開に関する有識者会議構成員

- | | | |
|----|-------|-----------------------------|
| 小関 | 忠 | 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 施設長 |
| ◎ | 永江 知文 | 京都大学 名誉教授 |
| | 成木 恵 | 京都大学 大学院理学研究科 教授 |
| | 野中 千穂 | 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授 |
| | 日高 義将 | 京都大学 基礎物理学研究所 教授 |
| | 藤井 啓祐 | 大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 副センター長 |
| | 前田 幸重 | 宮崎大学 工学教育研究部 准教授 |
| ○ | 三原 智 | 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授 |
| | 三輪 浩司 | 東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 教授 |
| | 吉田 善章 | 自然科学研究機構 核融合科学研究所 所長 |

◎：座長、○：座長代理

(令和6年7月現在)

EIC 計画及びこれに関連する原子核物理学の 新たな展開に関する有識者会議について

令和 6 年 5 月 1 日
文部科学省研究振興局長決定

1. 趣旨

量子科学技術を量子コンピュータや新たなエネルギー源として幅広く応用するには、核スピンのコヒーレンスの起源や、外部環境との相関を考慮に入れた量子開放系の挙動等、量子に関する未解明な学理に対する理解を深め、量子系の能動的制御を可能にすることが必要であり、原子核物理学、情報学、数学等の幅広い分野の研究コミュニティが連携して取り組むことが求められる。

そのため、「量子産業の創出・発展に向けた推進方策」（令和 6 年 4 月 9 日 量子技術イノベーション会議決定）において、量子科学技術の基礎学理を探究する大学・研究機関等の研究体制を抜本的に強化するとともに、人材育成を進めることが重要とされたところである。

一方、EIC 計画は、核子のスピンや質量の起源解明を通じて、量子とエネルギーに関わる根源的な理解を目指す原子核物理学分野の国際共同プロジェクトであり、2026 年に建設開始、2032 年に実験開始を予定している。2022 年には国際共同実験グループが設立され、我が国を含む 24 カ国の研究者等が参加してきた。

今般、米国エネルギー省から、文部科学省に対して、米国ブルックヘブン国立研究所で建設準備が進んでいる世界初の偏極電子と偏極陽子・原子核の衝突型加速器（Electron-Ion Collider, EIC）計画への参画要請があったところである。

こうした状況を踏まえ、EIC 計画への我が国の参画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開について、専門的見地から検討を行うため、本会議を設置する。

2. 構成員

- (1) 本会議は、別紙の者により構成するものとし、研究振興局長の指名により座長を置くものとする。
- (2) 本会議には、必要に応じて、構成員以外の者を参画させることができるものとする。

3. 検討事項

- ・ EIC 計画への我が国の参画について
- ・ これに関連する原子核物理学の新たな展開について

4. 設置期間

令和 6 年 5 月 1 日～令和 8 年 3 月 31 日

5. その他

本有識者会議に関する事務は、研究振興局基礎・基盤研究課素粒子・原子核研究推進室において行う。