

日本の原子核物理学の現状と EIC計画への期待

中野貴志

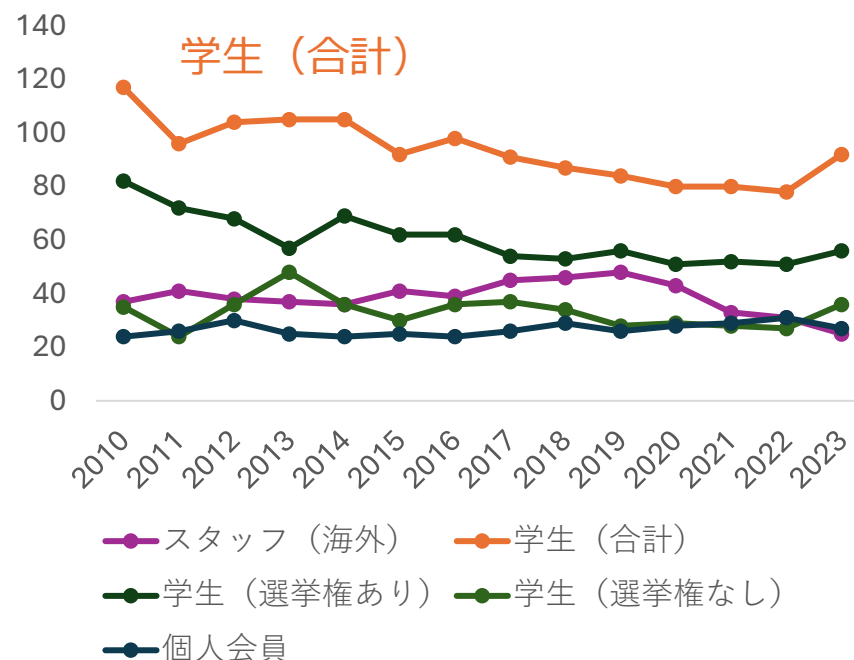
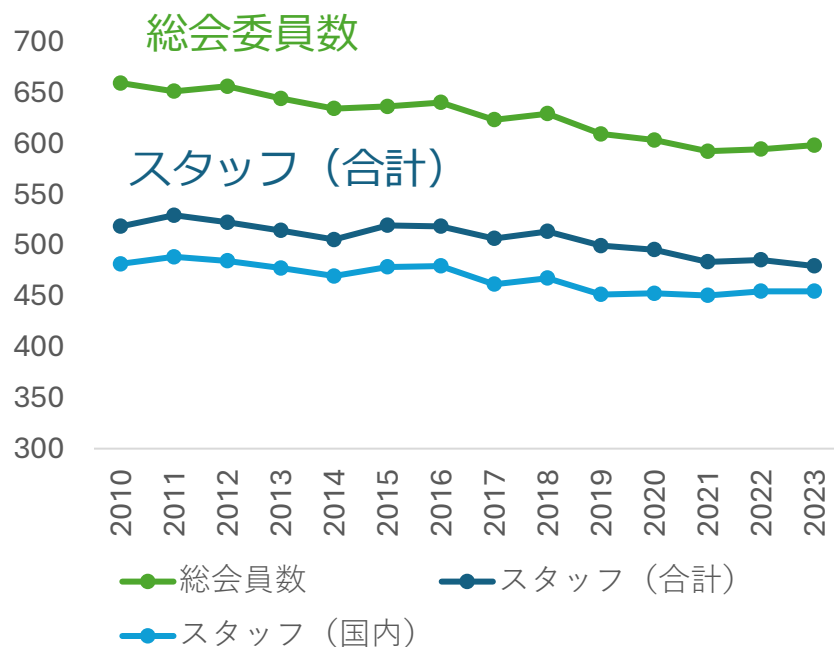
大阪大学核物理研究センター

2024年6月14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（第2回）

- 大学教員等の原子核物理学の**研究者数は減少傾向**。本分野を志す**学生数も減少傾向**
- このままでは、我が国の原子核物理学の**研究体制は脆弱化する危惧**
- 一方、**原子核物理学を学んだ者は**、エネルギー関連企業、コンピュータ関連（量子コンピュータを含む）企業、金融業、コンサルティング業などの**幅広い分野で活躍**

原子核談話会（実験核物理分野の研究者により構成される会）の会員数の推移

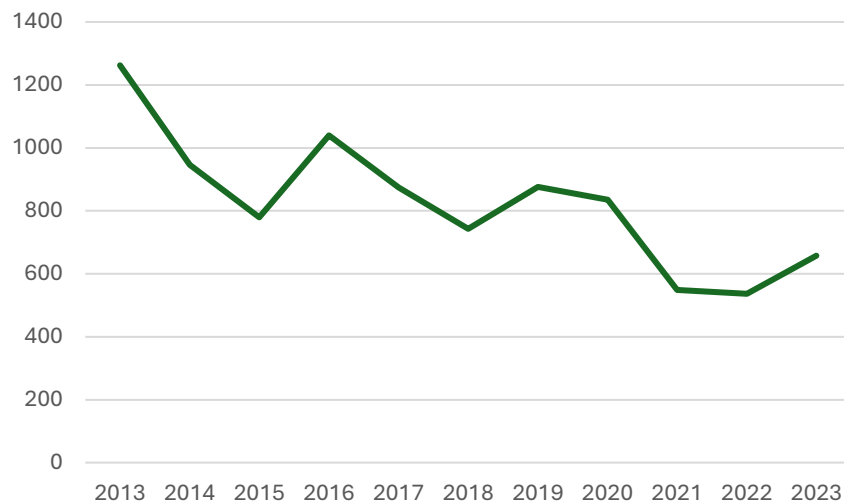


原子核談話会に所属する組織数（大学・機関・企業）は約150であり、1組織あたりの平均会員数は約4名。原子核物理学のみならず**多くの関連分野で活躍**している。

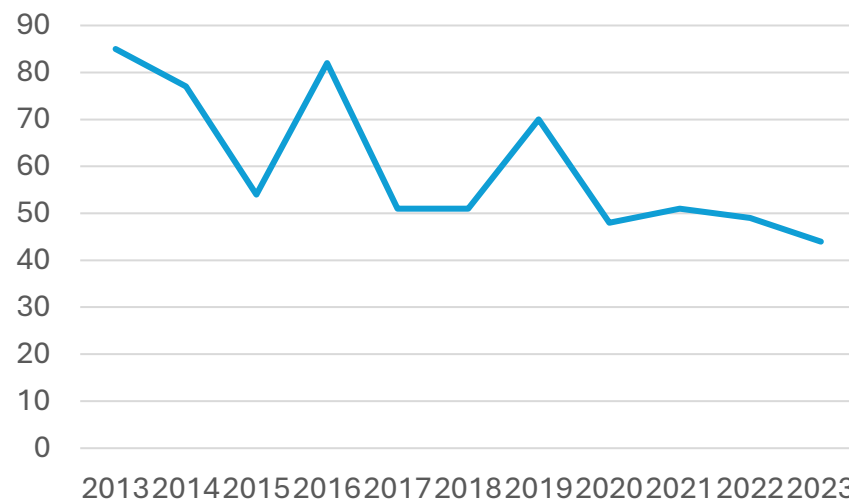
- 我が国の原子核物理学関係の論文数は減少傾向
- 被引用数が上位10%にはいるTOP10%論文数も減少傾向
- このままでは、我が国の原子核物理学の研究力が減衰する危険性がある。

大阪大学核物理研究センターによる分析

我が国の原子核物理学の論文数



我が国の原子核物理学のTOP10%論文数



TOP10%論文数とは、論文の被引用数が各分野の上位10%に入る論文の数。論文が多く、研究者に引用されていることは、その論文の質が高いこととも関連すると考えられている。

原子核物理学の実験研究に関する論文では、**大型国際共同研究**の成果が、TOP10%論文に占める割合が高い傾向にある。

原子核物理学の特徴

1. 原子レベル以下の幅広い階層で、複雑な量子多体系を研究対象として扱う。
2. 比較的小規模な体制で実験が可能であり、プロジェクト全体を俯瞰する能力が養われる。
3. 応用範囲が広く、社会に直接的な影響を与える分野でも重要な役割を果たす。

今後の課題

1. 研究の国際化・大型化・長期化への対応
2. 先端基盤技術の効率的な開発と継承

基礎科学

精密核物理研究で世界をリード
国際頭脳循環を加速

異分野融合

MuSIC
(連続ミュオンビーム)
ミュオン科学

隕石や考古学資料の非破壊検査、Kプロへの貢献

リングサイクロトロン
世界最高性能

加速器科学

AVFサイクロトロン

白色中性子照射場
半導体ソフトエラー

宇宙、自動車、ロボット産業への貢献

産業応用

短半減期RI生成
アルファ線核医学治療

難治性がんを対象とした
2件の医師主導治験
創薬ベンチャーの設立

ハドロン実験：SPRING-8に専用ビームラインを整備。J-PARCに高運動量ビームラインを整備予定

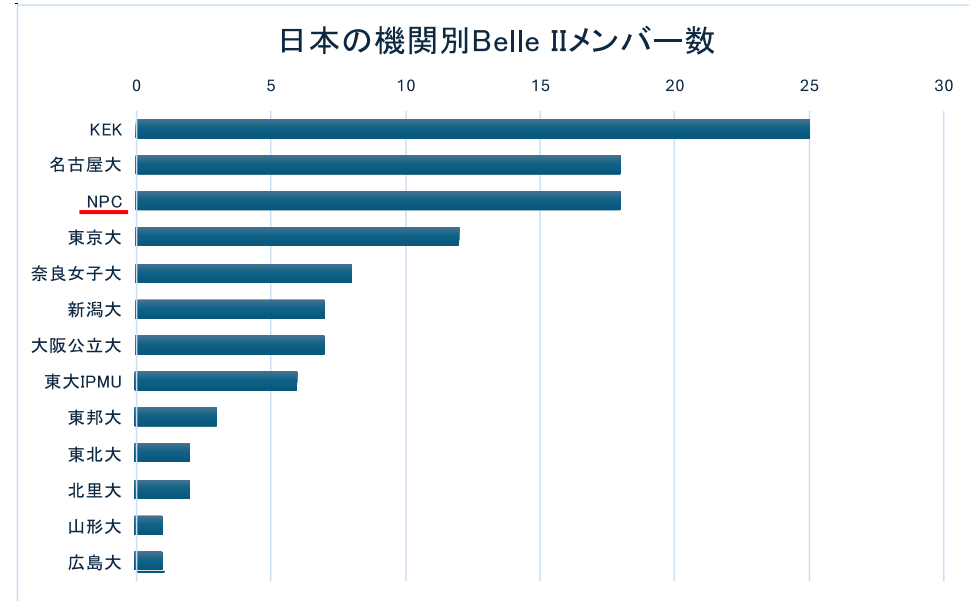
ニュートリノレス2重ベータ崩壊：東北大学ニュートリノ科学センターと連携して神岡に国際研究拠点を形成

大型国際共同研究：Nuclear Physics Consortium (NPC) を形成して、Belle/Belle II実験に参加

基盤技術開発：SPADI Allianceを形成して、データ収集システムを開発

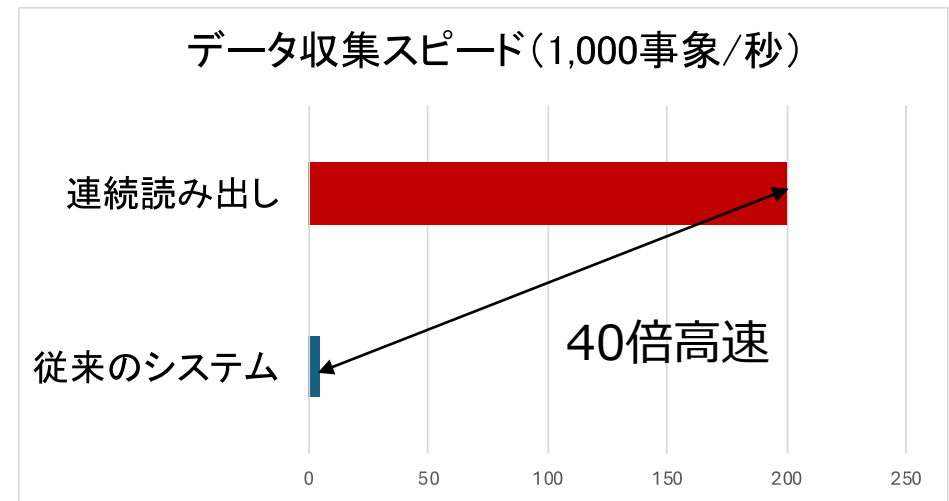
Nuclear Physics Consortium (NPC)

- NPCは、KEKのSuperKEKBで実施されるBelle及びBelle II実験を支援する研究組織。2009年4月に設立
- 日本及び近隣諸国の複数の研究機関の核物理研究者が参加
- 原子核物理学の視点と興味で Belle/Belle IIデータを解析
- Belle II実験のハードウェアやソフトウェアの開発にも貢献
- 核物理研究センターの計算機資源の一部をBelle IIに提供

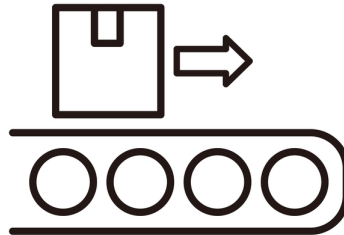


SPADI Alliance

- 標準データ収集系の必要性を共有する研究者によって構成された開発共同体
- 2024年4月現在、129名の研究者が参加し、21の研究機関が関わっている。
- 各研究機関の知見や技術を持ち寄り、協力して開発を推進
- データ収集システムの標準化や共通化を目指して活動

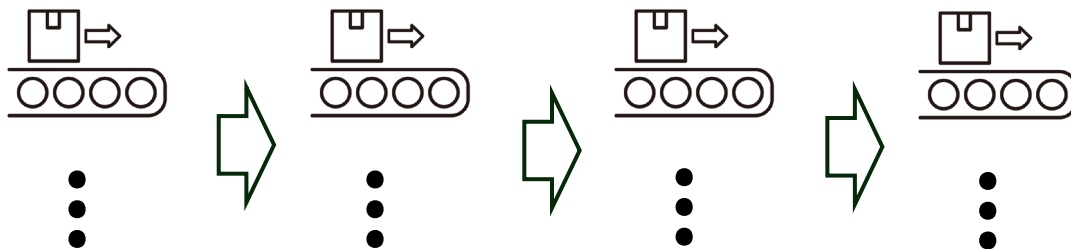


従来のデータ収集システム



箱の中身を確認している間は、ベルトコンベヤを一時停止する。

ストリーミング型データ収集システム



並列処理のためのベルトコンベヤ群を階層的に接続することで、ベルトコンベヤを停止することなく、箱の中身を確認し選別する。

- EICでは、400 Tbpsのデータを0.1 Tbpsに圧縮する必要がある。
- 今後、原子核物理だけではなく、大量のデータをリアルタイムで扱う多くの分野でキーテクノロジーとなる可能性がある。

検出器

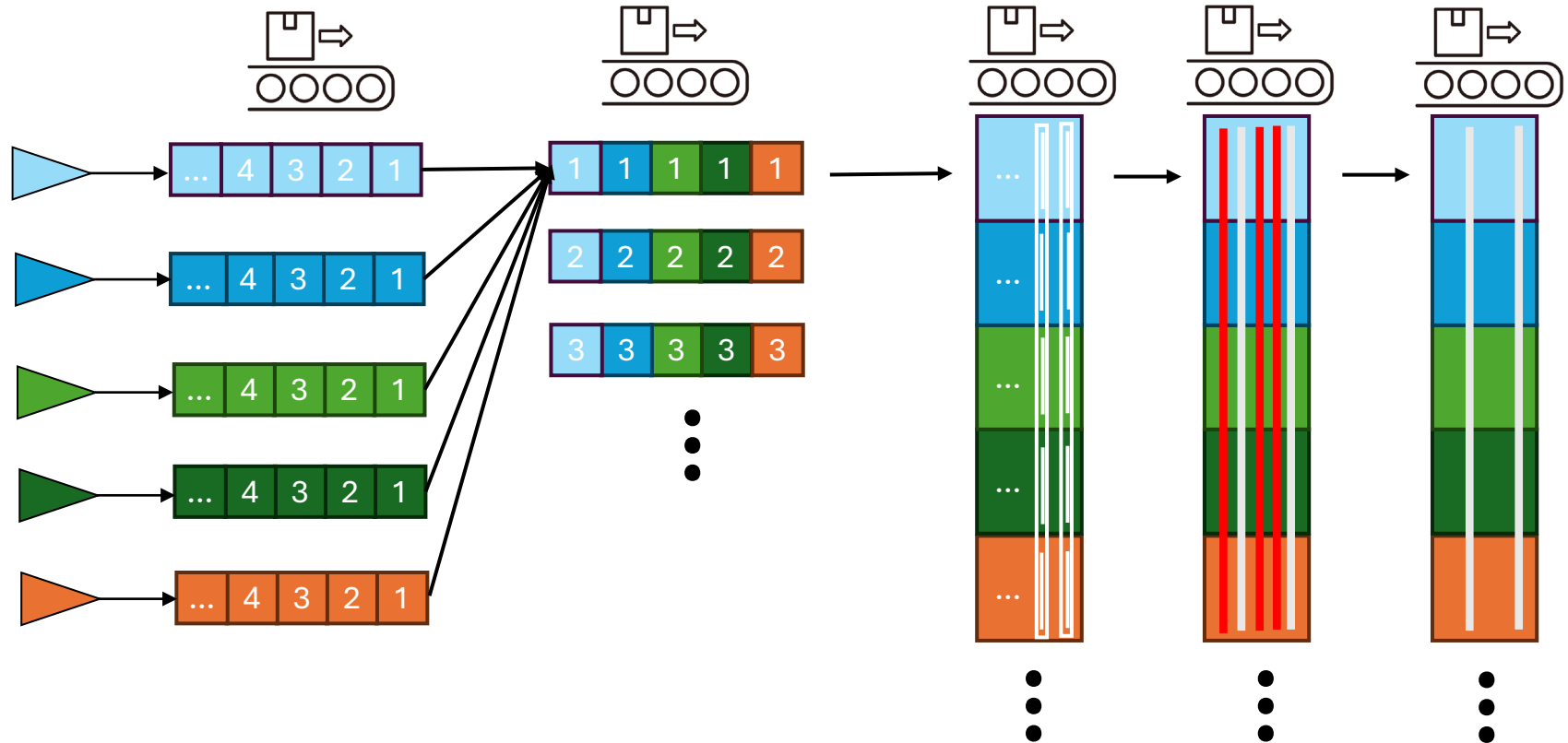
箱詰め

フレーム再構築

時系列抽出

事象再構築

事象選別



タイムフレーム付きの箱に高精度時間情報付きのデータを順番に詰める。

タイムフレームが変わる毎に高速スイッチで箱の行き先を変更

後段の階層はCPUが用いられているがGPUやFPGAによる高速化が検討されている。

1. 大規模化の課題

- 大規模なシステムの構築・修正が困難
- 資源の柔軟な活用が必要

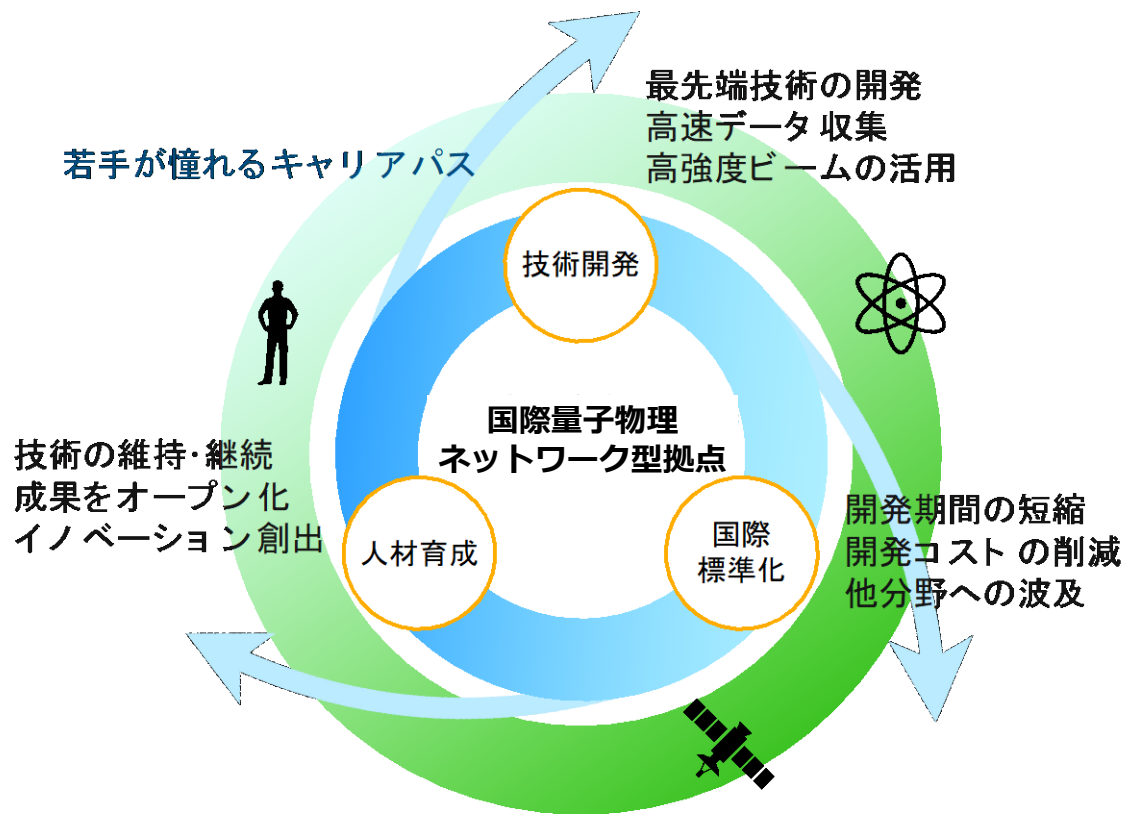
2. データ収集システムへの要求

- 大規模データのリアルタイム高速処理
- 検出器や環境変更に対する柔軟な対応

3. 開発の方針

- 高速処理を実現する鍵となるモジュールを開発する。
- 並列処理のプロセス数や階層構造を自在に変更することができるシステム制御・管理アーキテクチャーを開発する。
- 小規模から大規模まで対応可能なスケーラビリティを実現する。
- EICで実装することにより、システムの国際標準化を目指す。
- システムの基礎となる技術や手法を他分野や産業界に波及させる。

(例：量子と古典のハイブリッド・ネットワークによるスケーラブルな量子コンピュータの開発)



1. 東京大学と大阪大学が連携し、国際量子物理ネットワーク型拠点を立ち上げる。
2. SPADI Allianceの規模を拡大し、国際的な開発プラットフォームを形成
3. 国際連携、国内連携、人材育成機能を強化
4. スケーラビリティのあるデータ収集システムの開発
5. 国際的な大規模実験であるEICでのシステム実装
6. 国際標準化により日本の量子物理分野の国際的地位向上を目指す

スケーラブルでトランスファラブルな技術および人材の育成

科学的な価値に加えて、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**
 - フュージョンエネルギー： $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\,{}^4\text{He}$ 反応による核融合
4. これらに関連する**人材育成に貢献**

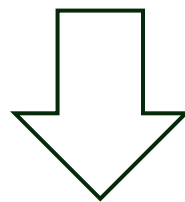
1. 生成されるのはヘリウム核 (α 粒子) で、 α 粒子のエネルギーを直接電気エネルギーに変換できる可能性があるため、高い効率が期待される。
2. 水素・ホウ素反応では、中性子の発生が他の核融合反応に比べて少ないため、炉材料へのダメージが軽減される。
3. ホウ素は地球上で容易に採掘でき、トリチウムよりも入手が容易で取り扱いも簡単

原子核物理学

×

量子情報科学

AMDやTDHF等の量子多体系の近似計算手法



量子コンピュータによる高速化

精緻な評価
が必要な量

- 反応断面積
- 各種付随反応による中性子生成
- 生成 α 粒子のエネルギースペクトル

1. 原子核物理学を学んだ人材は、基礎科学のみならず、加速器科学、産業応用、異分野融合の幅広い分野で活躍している。一方、日本の原子核物理学研究者数は減少傾向にあり、研究体制の脆弱化が懸念される。
2. NPCは、大型国際共同研究であるKEKのBelle II実験に小グループに属する研究者が参加することを支援する組織であり、EIC計画に参画する研究者を増加させる体制を構築する際に参考になる。
3. データ収集システムは、従来のシステムからストリーミング型へと発展し、大量のデータを損失なく、かつ、リアルタイムで処理することが可能になりつつある。
4. SPADI Allianceは、標準データ収集系の開発を目指す共同体で、129名の研究者と21の研究機関が関わっている。同組織は、スケーラビリティのあるデータ収集システムの開発を進めており、EICでの実装を通じて国際標準化を目指している。
5. 国際量子物理ネットワーク型拠点を形成し、EICに参画することで、日本の量子物理分野の国際的地位向上と、スケーラブルでトランスファラブルな技術および人材の育成による幅広い分野への高い波及効果が期待される。