

超伝導加速器研究拠点

① ビジョンの概要

超伝導は加速器の高性能化、高効率化、小型化に欠かせない技術である。特に超伝導加速器の特徴である大強度ビームを活用すれば、従来の学術研究はもとより加速器利用をさらに拡大し、広範な応用分野を新しく創出することが可能となるであろう。超伝導加速器の研究拠点の建設整備を行い加速器開発の飛躍的進展をはかるとともに、加速器応用の新分野創出や加速器科学の発展を支える人材育成を推進する。

② ビジョンの内容

1930年代から現在にいたる素粒子・原子核物理学の飛躍的な発展の歴史は粒子加速器の進化の歴史でもある。また、放射光、中性子、ミュオンなどを含む加速器で得られる多様なビームは、物質科学や生命科学の研究において、さらには医療や産業応用の分野において、今日、極めて重要な役割をはたしており、現在も様々な新しい可能性が開拓され続けている。加速器科学の20-30年後を考えると、より高いビームエネルギー、より大きなビーム強度という二つの方向性を軸に、加速器の高性能化、さらには持続可能なシステムとしての高効率化、小型化を実現していくことが極めて重要であることは明らかである。本ビジョンは、現在すでに加速器において不可欠な技術となっている超伝導技術をより高度化することによって、このような加速器科学の未来にむけた諸課題に取り組み、加速器の可能性をさらに開拓していくものである。また、その取り組みを通して次世代を担う若手人材の育成を推進する。

③ 学術研究構想の名称

超伝導加速器研究拠点

④ 学術研究構想の概要

本施設構想は将来にむけた加速器の諸課題のなかでも超伝導技術に特化して加速器の高性能化、高効率化、小型化を実現する提案であり、今後の10年間で超伝導高周波空洞と超伝導電磁石を中心に開発および施設整備を進めるものである。高周波空洞については(1)超伝導空洞の加速勾配とQ値を高める研究、(2)Nb₃Snの薄膜を用いることによる小型化、(3)高性能超伝導加速空洞を用いた大強度電子ビーム照射設備の設計、(4)次世代半導体の製造に用いるEUV-FEL施設の実現にむけた開発、(5)大電力高周波源の高効率化、(6)BNCT用加速器の超伝導化に向けた開発等を行ない、(a)小型大強度電子ビーム照射設備、(b)EUV-FEL評価設備、(c)超伝導BNCT設備整備を行う。超伝導電磁石については従来の超伝導材料が性能限界を迎えておりNb₃Snや高温超伝導などの先進超伝導材料による高磁場超伝導電磁石技術の確立が必須となっており(1)新材料による超伝導電磁石の高磁場化、(2)大強度加速器で重要性を増している超伝導電磁石の耐放射線性能の向上に関する研究等を行ない、(d)超伝導電磁石評価設備を整備する。これらの研究開発拠点を活用し、超伝導加速器の幅広い活用を行うための人材育成も行っていく。

⑤ 学術的な意義

超伝導加速空洞の特徴はその表面抵抗の少なさ(高Q値)である。この高Q値をさらに高める空洞製作技術や表面処理技術は重要な開発要素である。超伝導空洞の最大の利点である大電流ビームという特徴を生かすためKEKではエネルギー回収型ライナック(ERL)という新たな加速器開発を行っている。ERLを用いたEUV-FEL評価設備を整備することで、基礎科学分野のみならず、従来の半導体用リソグラフィ光源では不可能な出力10kW以上のEUV光源の評価が可能となる。また、新たな超伝導材料Nb₃Snは次世代超伝導加速空洞の実現に向けた重要な開発要素である。Nb表面にNb₃Snの薄膜を数 μ m程度形成させる蒸着法が確立すれば、大型冷凍機を必要とするNbに比べ小型冷凍機を用いた伝導冷却によるコンパクトな超伝導加速器が可能となる。本提案では、このNb₃Sn空洞技術を確立し、さらに新たに小型大強度の電子ビーム照射加速器設備を整備することで木材照射によるナノセルロース製紙、水の浄化、アスファルトの強度化、医療用の放射性医薬品の大量生成など、学術界及び産業界への波及効果も極めて大きい研究開発を進める。高効率の高周波源は、従来の約半分の消費電力で加速空洞の運転が可能となり、超伝導加速器のみならずすべての高周波加速型の加速器の高効率化に貢献する。BNCTは有効ながん治療法の一つであるが、病院に設置できる加速器ベースBNCT普及の決め手は機器価格の適正化であり、その達成には加速器本体の小型化と省エネ化が必要である。さらに発生中性子のエネルギーを選ぶことにより、物性研究、製品分析等も可能となる。中性子利用の有用

性が広く認識されつつある中で、小型化することで一気に普及する可能性がある。

素粒子原子核物理の分野では高耐放射線性能を持つ高磁場加速器用超伝導電磁石の開発が必須となっている。また、電磁石の高磁場化は、加速器の小型化にも寄与し産業及び医療用加速器への貢献も大きい。特に高温超伝導など新材料を使った加速器磁石技術は産業・医療応用の観点からも重要な技術となる。また高耐放射線性能を持つ高磁場電磁石は大強度加速器施設で二次粒子生成装置の高度化高効率化の観点から必須の技術となるだけでなく、ミューオンの産業応用など幅広い応用に道を拓く。超伝導電磁石の高磁場化・高耐放射線化は核融合分野においても欠かせない技術である。

本提案ではこれら4設備からなる超伝導加速器の施設を整備することで国内唯一の研究拠点を形成する。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

超伝導空洞を用いた FEL 加速器は、ドイツ、アメリカ、中国で建設が進められているが、ERL 型の FEL は大電流ビームを用いエネルギー回収も可能な新しい加速器である。Nb₃Sn 空洞開発はアメリカのフェルミ研究所などと日米共同で行っている。高周波源の高効率化は世界の加速器研究機関などでも精力的に進められている。BNCT 用加速器では標的の寿命と機器の放射化を考慮すると陽子エネルギーは 10MeV 前後が望ましいが、加速器の構成が複雑になるためこのエネルギー領域の加速器を使う BNCT の計画は少なく、更に超伝導加速器は皆無である。加速器用高磁場超伝導電磁石の開発は FCC のような将来の大型加速器実現のために欧米を中心に国際協力での開発が盛んで、日本の貢献に対する期待も非常に高い。

⑦ 社会的価値

本施設建設の要点は超伝導を用いた加速器の高効率化と小型化であり SDGs に貢献する。EUV-FEL 技術はわが国の半導体用 EUV リソグラフィーの加工のスループットを上げる革新的技術である。Nb₃Sn 空洞を用いた小型大強度照射加速器では、核医学薬剤である ⁹⁹Mo 等の国内での大量生産を可能とし、木材からのナノセルロースの高効率生成にも寄与する。癌治療の選択枝を増やす BNCT は既存の治療法と相補的であるため社会的価値は高い。

⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール及び所要経費：「Nb₃Sn を用いた小型大強度電子ビーム照射設備」(81 億円)は、前半5年間で Nb₃Sn 空洞の開発、大電流電子銃及び照射ターゲットの試験機開発等を行い、後半5年間で施設建設を行う。「次世代半導体用 EUV-FEL 評価設備」(63.3 億円)は、前半5年間で実証機に使用する超伝導加速空洞の製作、冷凍機増強、FEL の短波長化に向けたアンジュレータの製作及び高輝度大電流電子銃開発を行い、後半5年間でより高効率より短波長の FEL 発生を目指した加速器の増強等を行なう。高加速勾配、高 Q 値開発、および Nb₃Sn の開発は上記2つの施設建設の中で実施される。「クライストロンの高効率化」(27.3 億円)は、2年目にプロトタイプ、5年目以降に量産モデルを製作し、EUV-FEL 評価施設に実装する。「超伝導 BNCT 設備」(23. 億円)は、1年目に基本設計、2年目に空洞試作、3年目に試作空洞の測定・評価、その後、実機製作、8年目には冷却系への組み込みを実施して施設を完成させ、9年目から加速器の評価運転を開始する。「超伝導電磁石評価設備」(32 億円)は、最初の2年間で磁石開発に必要な線材試験設備と磁石開発設備を整備する。磁石試験設備の整備は2年目から開始し6年目までに完了する。同時に線材の開発を国内の企業及び大学などと連携して6年間で段階的に進める。12T 大口径二極磁石を7年目までに開発し、最終年度までに 20T を目指した試験を行う。総経費は KEK での施設運営費を入れて 243.3 億円である。

実施機関と実施体制：高エネルギー加速器研究機構の加速器研究施設、共通基盤研究施設が中心となり、国内外の研究機関と連携して進める。加速器研究施設には超伝導加速器の開発研究とそれによる人材育成を目的として iCASA (応用超伝導加速器イノベーションセンター) が設置されている。iCASA では超伝導加速空洞の製造から評価、さらにビーム試験までをすべて行うことができる。これまでも Fermi 研究所や DESY をはじめとする海外の研究機関と連携して空洞開発を主導してきた実績を持つ。共通基盤研究施設の超伝導低温工学センターは加速器や検出器に用いる低温・超伝導磁石の開発研究を長年にわたって先導し、J-PARC や CERN の LHC などにおいて本質的な役割を果たしてきた。本施設構想はこれらの研究基盤や実績に基づいて超伝導加速器開発のさらなる発展を目指すものであり、施設の建設・利用を通じて幅広い分野の人材育成を行う。

⑨ 連絡先

小関 忠 (高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設)