

大強度陽子加速器施設計画の比較表

平成12年1月20日

大強度陽子加速器施設計画（仮称）評価専門部会

1. 原子炉による中性子源と加速器による中性子源との比較

表1 中性子発生源による特徴（長所・短所）の対比

項 目	加速器利用（パルス中性子）	原子炉利用（連続）
中性子源性能	○国内外の代表的施設 ・ ISIS（ラザフォード・アブルトン研究所、イギリス）： ピーク熱中性子束 $2 \sim 10 \times 10^{15}$ [n/cm²/s] ・ KENS（高エネルギー加速器研究機構） ピーク熱中性子束 3×10^{14} [n/cm²/s] ○瞬間的に高い、高輝度の中性子束 ・ 一定時間の照射を要する RI 製造等には不向き ・ 弱いシグナル検出も可 ○現状の性能では偏極中性子強度が低い ○熱外中性子の強度が比較的に強い	○国内外の代表的施設 ・ ILL（ラウエ・ランジュバン研究所、フランス） 熱中性子束 1.2×10^{15} [n/cm²/s] ・ JRR-3M（日本原子力研究所） 熱中性子束 3.0×10^{14} [n/cm²/s] ○中性子束の時間平均値は高いが、時間に依らず一定 ・ RI 製造、即発ガンマ線分析等に適している ・ 相対的に弱いシグナルの検出は難しい。 ○偏極中性子強度が比較的高く、磁性測定実験に有利。
実験容量 （出力×測定装置） （長計・第四分科会、 第3回、資料—5 より）	○実験容量：51 kW・台（KEK-KENS） ○ユーザー数：約200人（KEK-KENS）	○実験容量：185,000 kW・台（1970年、日本全体） 455,000 kW・台（現在） ○ユーザー数：約700人（JRR-3、KUR）
測定の範囲、手法 等	○幅広いエネルギーの中性子を一度に利用可能 ○広い散乱特性（移行運動量、エネルギー）の測定向き ○中性子エネルギーを選別可能なので測定装置は固定型 ○データ解釈に高度な解析技術が必要となる場合が多い	○単一エネルギーの中性子を利用 ○狭い範囲の散乱特性の測定向き ○中性子エネルギーを選別する測定装置可動の操作が要 ○データの解釈が比較的易しい。
中性子強度向上の 見通しと課題	○可 能 ・ 大強度陽子加速器計画、SNS 計画等で見通し有り ・ 加速器出力 4 MW の中性子源で ILL 炉と同等の平均熱中性子束が得られる可能性 ・ 加速器性能の増力、ターゲット、減速材の工学技術開発が必要	○困 難 ・ 研究用原子炉新設の立地許可を得にくい状況 ・ 高い出力を得るために濃縮度の高い燃料が必要 ・ 現状と同程度の強度であれば、物質の中の機能発現・ダイナミクスを観察する要求には応えられない。

中性子利用研究では、物質の中の動きを観察するために、現在よりも一層強度の高い中性子源を必要とする傾向にある。

上記した特徴によって、中性子強度を向上させるための世界的な動向は、加速器による中性子源開発となっている。

2. 研究手法の特徴及び他機関の研究との比較

表 2.1 光量子（X線）と中性子の特徴比較（相補性）及び既存施設利用との比較

特 徴	光量子（X線）	中性子		
対応するエネルギー	・ $\sim$ keV	・ eV$\sim$マイクロ eV：原子、生体高分子の振動エネルギーに近い ・ 熱中性子、冷中性子の波長は原子、高分子の配列間隔と同程度 ・ 熱中性子、冷中性子のエネルギーは原子、高分子の揺らぎのエネルギーと同程度で物質の配列、運動状態の研究に不可欠		
透過性	・ 弱い 表面物性の観察に適 X線トポグラフィー	・ 強い バルク物性の観察に適 中性子トポグラフィー		
研究内容	光量子（X線）	中性子	大強度陽子加速器計画	その他の既存施設利用
新素材の結晶構造解析	電子分布を見る 構造情報のみ	核の分布を見る 応答も含まれる	・ 1 万分の 1 グラム程度の試料 ・ 数十分の 1$\sim$数千分の 1 秒で、機能発現過程を 1 コマ撮影可能	・ 10 分の 1 グラム程度の試料 ・ 数十分で 1 コマの撮影
散乱の強度と元素	重い原子からの散乱が強い	軽い原子（H、O）からの散乱も観測可能		
高温超伝導	重原子構造	酸素構造	・ 非弾性散乱の測定 1 本の単結晶で可能 ・ 偏極中性子により、磁性散乱の寄与が測定可能	・ 非弾性散乱の測定 10 本近い巨大な単結晶が必要
構造生物学	基本構造 ・ DNA 3 次元構造決定* ・ 分子振動が見えない	水素位置構造 ・ DNA の水素位置情報 ・ 分子振動が見える	・ 構造を数時間で測定 ・ 分子振動を数日程度で測定可能	・ 構造測定に長時間を要 ・ 分子振動の測定は不可能
磁気散乱	空間相関・時間相関を 独立に観測 ・ 静的磁気構造	時間・空間相関を同時に 観察 ・ 動的磁気構造 ・ 偏極中性子を利用	・ 運動量変化が小さく、エネルギー変化の大きい領域まで測定可 ・ 偏極中性子強度が強い	・ エネルギー・運動量空間が限られた部分の測定 ・ 偏極中性子強度が弱い
ラジオグラフィー	重元素を含む試料の 実スケールの内部構造	軽元素を含む試料の 実スケールの内部構造	・ 測定時間の短縮 ・ 試料の大型化が実現	

*：この他、核磁気共鳴法（NMR 法）も利用可能。試料で水素と重水素等の同位元素の置き換えを行い、水溶液中の DNA の 3 次元骨格が求まるが、ドラッグデザインに必要なアミノ残基は運動しているため、中性子でなければ観測できない。

表 2. 2 ミュオン科学研究に関する特徴と他施設との比較

研究内容	大強度陽子加速器施設計画	その他の施設
物質科学 ・磁性・高温超伝導体の研究 ・表面・界面特性	発現メカニズムのより精密な解明 ・ミリグラムの試料 原子磁気能率 0.001 以下の微小磁性が測定可能 ・毎秒 10000 個の超低速ミュオンが発生 ・材料の表面の運動状態の研究が可能	・数グラムの試料 微小磁性は原子磁気能率、0.01 が測定限界 (RAL-ISIS) ・超低速ミュオンは毎秒 1 個程度
生命科学 ・有機物質の研究	・複雑な構造と機能の研究が可能 ・10 種類以上の信号が分離可能	・単純な有機物質に限定 ・2~3 種類の信号の分離が限界 (RAL-ISIS)
ミュオン触媒核融合	・核融合研究に必要な X 線検出は毎時 1000 回 ・極限状態での核融合研究、精密測定が可能	・核融合研究に必要な X 線検出は毎時 10 回 (RAL-ISIS)
量子電磁気学の精密検証	・ミュオニウムの 1s-2s 間の遷移エネルギーを 1 MHz 程度の精度で測定 (ミュオンの質量の 0.1 ppm に相当)	・ミュオニウムの 1s-2s 遷移エネルギーを 15 MHz 程度の精度で測定 (RAL-ISIS)

表2. 3. 1 短寿命原子核ビームに関する発生源の比較

項 目	大強度陽子加速器施設計画	RI ビームファクトリー
短寿命原子核の生成方法	・ 標的に生じた短寿命核を質量分析器で分離し、後段加速器で加速する、迅速質量分析・再加速方式	・ 高エネルギー重イオンを標的核に当てる入射核破砕で生成された核種を取り出す。
短寿命原子核のエネルギー	・ 核子当たり数 MeV の低エネルギー	・ 核子当たり数百 MeV ～1 GeV の高エネルギー
短寿命原子核による主な原子核反応	・ 低エネルギー短寿命核による標的核との融合反応、多数の核子移行反応	・ 中高エネルギー短寿命核による標的核との核破砕反応
短寿命原子核ビームの性質	・ 高品質、大強度ビーム	・ 中高エネルギービーム

○世界の動向

中高エネルギー短寿命核ビーム施設と低エネルギー短寿命核ビーム施設の両方を建設する方向にある。

フランス：GANIL 施設、中高エネルギー短寿命核ビーム施設（既存）、低エネルギー短寿命核ビーム施設を建設中

アメリカ：SNS 計画（ORNL 研究所）で低エネルギー短寿命核ビーム施設の敷設を提案

ミシガン州立大学で中高エネルギー短寿命核ビーム施設建設を計画

表2. 3. 2 短寿命原子核ビームを用いた研究に関する特徴と他機関計画との比較

研究テーマ	大強度陽子加速器施設計画	RI ビームファクトリー
核構造 核反応機構	・ 原子核の新しい魔法数、核変形の研究 ・ 強度の高い短寿命な中性子過剰核ビームによるクーロン障壁近傍の融合反応機構 ・ 短寿命核の質量や超微細構造分離などの精密測定	・ 核物質分布測定、核分光実験
短寿命核のミュオン X-線分光	・ ミュオンビームとの結合により、原子核の荷電分布測定を行うことができる。	・ 計画なし
物質の内部構造 新素材開発	・ 高純度短寿命核ビームの物質への打ち込み深さを精度良く調整できるので、物質科学、表面科学、生命科学におけるユニークな探索子を提供する。 ・ 物質中での熱拡散現象、格子欠陥、結晶構造 ・ 高性能半導体、耐放射線素材等の開発	・ 物質内部深くにまで短寿命核を打ち込むことができるので、ガン治療のシミュレーションなどの研究が期待できる。

表2. 4 原子核・素粒子科学研究に関する特徴及び他施設との比較

研究内容	大強度陽子加速器施設計画	その他の施設
ニュートリノ物理	- 発生強度：1000×10^6 個/cm²/秒 - ニュートリノ振動のパラメーター（質量差、混合率）の精密測定	- 発生強度：8×10^6 個/cm²/秒（KEK-PS） - 加速器ビームによるニュートリノ振動の確認
K中間子稀崩壊 （CP 対称性の破れ）	K_L の強度：400×10^6 /秒 - 稀崩壊モード、を 1000 事象検出可能	K_L の強度：8×10^6 /秒 - 稀崩壊モードの検出例はなし
ハイパー核物理	K^- 中間子強度：150×10^6/秒 - ラムダハイパー核分光： 1日に10個以上の順位を観測。 ハイパー核の磁気能率の測定 - 二重ラムダハイパー核、グザイハイパー核を 1日に数百個生成可能。 - ハイペロン・核子散乱を1日に1万個以上発生 可能。散乱特性の完全測定	K^- 中間子強度：1×10^5/秒（BNL-AGS） - ラムダハイパー核分光 1ヶ月で数個の順位を観測（KEK-PS） - BNL-AGS で3ヶ月に100個程度か？ - KEK-PS で1ヶ月千回程度の散乱
QCD（量子色力学）と カイラル対称性	核物質中の軽いベクトル中間子のみならず、重いベクトル中間子を生成させることができ、質量の変化の大きさを利用した研究が可能。	軽いベクトル中間子の実験のみ
反陽子物理 （反物質の研究）	反物質を生成させることができ、精密測定が可能	CERN で反水素の存在を確認したのみ
ハドロン分光	初めてグルーボールの質量などを確定する可能性	世界的にグルーボール存在の確定的証拠はない

表 2. 5 加速器駆動核変換工学研究に関する特徴及び他施設との比較

研究内容	大強度陽子加速器施設計画	その他の施設
材料照射・熱流動試験	・鉛・ビスマス合金流動ターゲット ・ビーム窓、ターゲット容器材料試験 —500 MeV, 200 kW 程度のビーム利用	・鉛・ビスマス合金ターゲット利用 PSI: 590 MeV, 600 kW のビーム利用 LANL: 800 MeV, 1 MW のビーム利用
低出力未臨界炉実験	・ウラン・ブランケットを付けた炉物理実験 動特性試験、温度特性など	・陽子ビーム入射した基礎実験の例 (CERN) ・14 MeV 中性子源と臨界実験装置による実験計画 (フランス CEA カダラッシュ)
実験プラント (将来計画)	・二酸化ウラン、窒化ウラン燃料等装荷 熱出力40ワット程度の実験	・ATW 計画の提案 (米国・エネルギー省) ・ヨーロッパのエネルギー増幅器 (ルビア博士提案)