JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX





物質・生命科学実験施設の実験装置 MATERIALS AND LIFE SCIENCE EXPERIMENTAL FACILITY (MLF)

目次

中性子・ミュオン実験装置配置図 …	1
中性子実験装置特性	2
中性子・ミュオン実験装置リスト …	3
各装置の紹介	5
共通試料環境機器	59
用語解説	61
利用案内	62

中性子・ミュオン実験装置配置図



中性子実験装置特性

MLF の中性子準弾性・非弾性散乱装置及び中性子回折装置の測定範囲を重ねて示しました。研究目的に応じて最適な特性を持つ装置を利用できます。



中性子・ミュオン実験装置リスト

ビームライン番号		装置名称	得られる情報	掲載ページ	
📕 中性子	中性子準弾性・非弾性散乱				
BL01	四季	4 次元空間中性子探査装置	スピン・原子・分子の運動	5	
BL02	DNA	ダイナミクス解析装置	原子・分子・スピンの拡散や回転 振動などの運動	7	
BL06	VIN ROSE	中性子共鳴スピンエコー分光器群	原子・分子の運動	15	
BL12	HRC	高分解能チョッパー分光器	固体中のスピン・原子・分子の運動、 スピン波分散測定 多結晶・液体のフォノン分散測定	25	
BL14	アマテラス	冷中性子ディスクチョッパー型分光器	格子振動、原子・分子の運動、磁気励起	27	
BL23	POLANO	偏極中性子散乱装置	固体および原子・分子中のスピン、軌道、電荷、 格子のダイナミクス、 固体中の交差相関物理情報	45	
📕 中性子	·回折				
BL03	iBIX	茨城県生命物質構造解析装置	結晶構造(単結晶)	9	
BL08	SuperHRPD	超高分解能粉末中性子回折装置	結晶構造、磁気構造	17	
BL09	SPICA	特殊環境中性子回折装置	結晶構造、磁気構造	19	
BL11	PLANET	超高圧中性子回折装置	結晶構造、液体・非晶質の構造(高圧)	23	
BL18	千手	特殊環境微小単結晶中性子構造解析装置	結晶構造、磁気構造(単結晶)	35	
BL19	匠	工学材料回折装置	結晶構造、格子歪み、欠陥密度、結晶配向(集合組織)	37	
BL20	iMATERIA	茨城県材料構造解析装置	結晶構造、結晶配向(集合組織)、原子配列(非晶質)、 ナノ構造	39	
BL21	NOVA	高強度全散乱装置	原子配列(非晶質、液体) 結晶構造、磁気構造	41	

ビーム	ュライン番号	装置名称	得られる情報	掲載ページ		
- 中性子	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー					
BL15	大観	中性子小角・広角散乱装置	ナノ構造、磁気構造	29		
BL16	SOFIA	ソフト界面解析装置	ナノ構造(界面)	31		
BL17	写楽	偏極中性子反射率計	ナノ構造、磁気構造(界面)	33		
■ 中性子	イメージング					
BL22	螺鈿	エネルギー分析型中性子イメージング装置	2 次元透過像・3 次元断層像 結晶組織構造、磁場、原子核種及び温度の空間分布	43		
📕 中性子	断面積測定・中性	子即発γ線分析				
BL04	ANNRI	中性子核反応測定装置	不安定同位体核の基礎特性、 元素分析、 非平衡現象の解明	11		
📕 中性子	基礎物理実験・中	性子デバイス開発				
BL05	NOP	中性子光学基礎物理実験装置	中性子の基礎物性、 中性子光学	13		
BL10	NOBORU	中性子源特性試験装置	テストポートとしての利用 (冷熱中性子、熱外中性子、高エネルギー中性子)	21		
● ミュオ	ンスピン回転緩和	共鳴				
D1	Muon D1	ミュオン物質生命科学実験装置	電子状態、磁気状態、ダイナミクス(電子、水素、イオン)	47		
S1	ARTEMIS	汎用 µSR 実験装置	電子状態、磁気状態、ダイナミクス(電子、水素、イオン)	53		
U1A	Muon U1A	超低速ミュオン顕微鏡実験装置	電子状態、磁気状態、電子・水素・イオンのダイナミクス (表面、界面)	57		
ミュオン基礎科学実験・負ミュオン X 線元素分析						
D2	Muon D2	ミュオン基礎科学実験装置	素粒子反応	49		
H1	Muon H1	大強度ミュオンビーム実験装置	ミュオンの基礎物理量、素粒子物理	51		
S2	Muon S2	ミュオニウムレーザー物理実験装置	ミュオン基礎物理量	55		



4 次元空間中性子探査装置(四季)

スピン系および格子系の動きを運動量・エネルギーの4次元空間にわたって 高い効率で幅広く観測

特徴

- ●フェルミチョッパー、高立体角検出器により広 い運動量・エネルギー空間を測定可能
- 高効率ビーム輸送系、大面積検出器、複数エネ ルギー測定による高い測定効率

装置の仕様

- 測定可能エネルギー:1~300 meV
- 散乱角度範囲 水平:-35~+130度 垂直:-25~+27度
- ●エネルギー分解能 :入射エネルギーの 5% 程度
- ●ビームサイズ :最大 45 mm × 45 mm
 (可変) 最適 20 mm × 20 mm

試料環境機器

- ヘリウム循環型冷凍機 (5~300 K;高温オプションにより600 Kまで 可能)
- ラジアルコリメータ (使用条件はお問い合わせ下さい)
- その他 MLF 共通試料環境機器

装置構成





ビーム輸送導管



真空散乱槽と冷凍機

大面積中性子検出器

4D-Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS)







- 0.1 ~ 20 Å⁻¹、1 ~ 数 100 meV の運動量・エネル ギー領域におけるスピン・原子・分子の運動
- スピン・原子・分子間の結合の強さ、スピン・ 原子・分子の運動と磁性・構造物性との関係

主な利用例

- 超伝導体における磁気励起や格子振動と超伝導機構の関係
- 量子磁性体、フラストレート磁性体¹⁾、遍歴磁性体²⁾における新奇磁性
- ●熱電材料における熱伝導率と格子振動の関係
- ●ガラスにおける過剰励起
- ●触媒材料における触媒機能と格子振動の関係



複数の入射エネルギー (E_i)を同時に用いて測定された CuGeO₃の励起スペクトル



J. Guo *et al., Phys. Rev. Lett.* **122**, 017001 (2019) (© 2019 American Physical Society).



W. Yao *et al., Nat. Phys.* **14**, 1011 (2018) (© 2018 Nature Publishing Group).

^{1) 2)} は用語解説 (p.61) をご覧ください。

ダイナミクス解析装置 (DNA)

ナノ秒領域のゆっくりとした原子・分子・スピン運動の測定による物質の機 能と運動の関係を解明

特徴

- 高分解能 (µeV) で幅広いエネルギー (meV) 領域のダイナミクス測定
- パルス整形チョッパーによるフレキシブルな分 解能・ダイナミックレンジ
- 革新的な低 BG 化 Si アナライザーによる高効率 かつ高精度測定

装置の仕様

- 測定可能エネルギー: -500 ~ 1500 µeV: Si(111)、 -2000 ~ 6000 µeV: Si(311)
- 運動量範囲 0.078 < Q < 1.98 [Å⁻¹]: Si(111)、 1.79 < Q < 3.40 [Å⁻¹]: Si(311)
- エネルギー分解能:
 Si111 1 cm slit: 2.2 µeV (300 Hz)、 2.4 µeV (225 Hz)
 Si111 3 cm slit: 3.1 µeV (300 Hz)、 3.6 µeV (225 Hz)
 Si311 1 cm slit: 11 µeV (300 Hz)
 Si311 3 cm slit: 19 µeV (300 Hz)
- ビームサイズ:3 cm(縦) × 2 cm(横)

試料環境機器

- トップローディングクライオファーネス (6K<T<650K)
- 自動試料交換機(3個、20個)
- 液圧印加装置(0.1 < P < 145[MPa]、室温のみ)
- 水蒸気印加装置(絶対圧制御、室温のみ)
- 電圧印加装置(*E* < 1.5 kV、200℃以下) 電流印加装置(*I* < 5 A、200℃以下)





装置構成

Si 完全結晶ウエハをアナライザーに用いた 背面反射型分光器



Biomolecular Dynamics Spectrometer (DNA)



BL02

得られる情報

- ●原子・分子・スピンのピコ秒からナノ秒に及ぶ 運動
- 拡散や回転、振動など運動の特徴を捉える

主な研究例

- ●生体物質(タンパク質、脂質、食品等)の機能解明
- ソフトマター(高分子、イオン液体、水和水、ゴム等)の機能解明
- 機能性材料(電池、触媒、強誘電体等)の原子運動の解明
- 磁性体中のスピン運動の解明



燃料電池触媒層中の水のダイナミクス T = 300 K 7 = 300 K Q=0.7 Å 0=0.7 Å Obser S(Q,E) / a.u. n'e/(10 ò 400 AE / uel AE / ueV Carbon ∽ა Jump diffusion of H₂O H₂O in FDRS 燃料電池触媒層中の水の階層的なダイナミクスを測定

K. Ito, et al., J. Phys. Chem. C 125, 12645 (2021). (©2021 American Chemical Society)





中性子回折

茨城県生命物質構造解析装置(iBIX)

高効率、高分解能で生体高分子や有機分子結晶の水素・水和構造を観測する 中性子単結晶回折装置

特徴

- ●幅広い波長領域の高検出効率。高分解能な二次 元検出器の開発により、タンパク質の構造解析 データを高効率に測定
- 試料周りのオープンな空間により、様々な周辺 機器を自由に配置可能



- 主な仕様(加速器出力:1 MW 時)
- 測定可能格子長:135×135×135Å³(過去最大の結晶格子体積を持つマンガンカタラーゼの単結晶構造解析で実証)
- 結晶サイズ:~1 mm³
- 測定日数 :4日程度

試料環境機器

- ガス吹付型低温装置(100~300 K)
- 高温装置(300~600 K)
- 延伸装置(荷重:200 N、延伸量:90 mm、 延伸速度:1~1000 μm/sec)

試料環境・外場機能



装置構成



CONTACT	
日下勝弘(装置責任者) k_kusaka@cross.or.jp	✗
坂倉輝俊 t_sakakura@cross.or.jp	Øcross
杉山晴紀 h_sugiyama@cross.or.jp	Øcross

9

IBARAKI Biological Crystal Diffractometer (iBIX)



得られる情報

- タンパク質の水素原子、プロトンの位置からタ ンパク質と薬剤、インヒビターとの水素結合の 有無およびプロトン互変異性
- アミノ酸残基の側鎖の OH、NH、NH₂の水素の 位置
- 重水 D₂O の D と交換可能な水素 H からそこの水 分子の存在
- X線では困難な重元素の周りの水素原子の位置
- 放射線損傷が少ない、室温におけるタンパク質 の構造
- X線では構造変化を受ける酸化還元酵素の無損 傷構造
- タンパク質と化合物の相互作用における水素結 合と疎水的相互作用の情報



タンパク質の回折パターン

主な研究例

- ●トランスサイレチンのアミロイド病を防ぐ4量体形成の鍵となる水素結合の観測
- セルロース分解酵素セルラーゼの加水分解過程のアミドーイミド互変異性を伴うプロトンリレーの可視化
- 光合成色素を合成するビリン還元酵素 PcyA-基質複合体の二つの水素化状態と構造的特徴
- 中性子で最も体積が大きい(135 Å)³の格子のカタラーゼの中性子結晶構造
- アミンをアルデヒドとアンモニアに分解する銅アミン酸化酵素の活性中心における非局在化プロトンの観測 と触媒機構の巧妙な仕組み(下図左)

背 景

ガスに変える)

視化に成功

CuNIRの 中性子結晶構造

本研究のブレイクスルー

ついて実験的な証拠を得ることに成功

● 地球の窒素循環を担う酵素 (銅含有亜硝酸還元酵素)の触媒反応の電子経路の実証(下図右)

"宙に浮いた"水素イオンから見える酵素触媒の巧妙な仕組み 一大型タンパク質の高分解能中性子結晶構造解析の成功によって明らかに-

背景

- 銅アミン酸化酵素: 一級アミン類をアルデヒドとアンモニアに分解す る酵素。活性中心には、銅イオンと補酵素トパキノンを含む。ヒト の血清中の本酵素は、糖尿病の発症にも関与
- 銅アミン酸化酵素の酵素反応機構の詳細を知るためには水素原子位 置の可視化が必要

本研究のブレイクスルー

- 記録を大幅に上回る大型タンパク質(分子量 70,600)の中性子結晶 構造解析に成功した
- ●酵素反応のしくみの解明に欠かせない"水素イオンの正確な位置"を 明らかにした

● 中性子結晶構造解析の適用範囲を大きく広げ、高分子量の有用タン

●中性子結晶構造解析がこれまで予想されなかった構造の存在や作用

パク質や薬剤開発の標的タンパク質の水素原子を含んだ立体構造決



銅アミン酸化酵素の高精度・高分

解能(高解像度)な中性子構造解

析用データ取得し、水素原子を含

定につながることが期待できる

機構を明らかにできることを実証

んだ立体構造決定に成功した

研究成果の意義



型が存在(一般的にはエノレー ト型と考えられてきた)

チジン残基の構造。手前 のヒスチジン残基には重 水素が結合しておらず (赤丸で囲んだ部分)、特 異なイミダゾレートアニ

オンが形成

補酵素トパキノンの構造と平 衡状態。エノレート型とケト



CuNIR の高精度・高分解能(高解 像度) な中性子構造解析用データ 取得し、水素原子をも含んだ立体 構造決定に成功



CuNIR 中で観察された銅イオン (茶色球) に結合した水酸化物イオン

今後の展開

● 産業応用:脱窒作用の働きを強化した微生物の利用、人工酵素の開 発

地球の窒素循環を担う酵素の反応機構を解明

— 銅含有亜硝酸還元酵素 (CuNIR) の全原子構造を高精度に決定—

● CuNIR: 土壌や水域中の窒素化合物が窒素分子へと変換される過程(脱

● CuNIR の化学反応(亜硝酸イオンへ水素イオンが渡される過程)の

● CuNIR の活性中心の銅イオンに水酸化物イオンが結合した状態の可

●これまでの実験から提案されていた化学反応機構を正しく書き換え

る可能性を示し、反応に必要な電子がタンパク質内を流れる経路に

詳細を知るためには水素原子位置の可視化が必要

空)の一部を担う鍵となるタンパク質(亜硝酸イオンを一酸化窒素)

● 一酸化二窒素ガス(温室効果ガス)の低減=大気環境の改善への貢献 肥料として環境中に過剰流入した窒素化合物の低減 = 環境汚染の改 善への貢献



中性子捕獲反応で生じる即発γ線を精密測定し、核データ測定、元素分析や 宇宙核物理等の原子核科学に関する研究を行う装置

特徵

- エネルギー分解能に優れる Ge 検出器と時間分 解能に優れる Nal 検出器、LaBr₃ 検出器を開発し 即発ガンマ線の精密計測が可能
- Li- ガラス検出器により全透過中性子を測定可能

装置の仕様

- 中性子エネルギー範囲: *En* > 0.0015 eV
- γ線検出器: Ge スペクトロメータ (飛行距離: 21.5 m) Nal(TI)検出器 (飛行距離: 28 m)
- 中性子検出器: Li-Glass 検出器 (飛行距離: 28.5 m)

装置構成



BL04

中性子断面積測定・中性子即発y線分析

ANNRI 内部の写真 左:Ge スペクトロメータ 右:Nal 及び Li グラス検出器



データ収集 (DAQ) システム開発







システム開発の様子



- 可変式コリメータ
 ビームサイズを 22、15、7、6 mm φ に調整可能
- 自動試料交換機
 ~ 200 個の試料を自動で交換可能
- ダブルディスクチョッパー 周回遅れの低エネルギー中性子をカット
- ・可動式中性子フィルター

 (Pb、Mn+Co+In+Ag、Cd)

 ・性子ビーム上のγ線の低減
 ・性子ビーム強度の調整、B.G.の推測



CONTACT



Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument (ANNRI)











主な利用例

- Ge スペクトロメータ、大型 Nal スペクトロメータによる Cm 同位体、Am 同位体、²³⁷Np 等の中性子捕獲 断面積研究
- Li- ガラス検出器による Am 同位体の中性子全断面積の測定研究
- 飛行時間法を用いた新しい即発ガンマ線分析法開発
- ¹¹²Cd(n, γ) 反応と¹¹⁵Sn の天体起源
- 複合核共鳴における離散的対称性の破れの研究

核変換に向けた核データ測定研究

マイナーアクチニド核種 (MA) や長寿命核分裂生成核 種 (LLFP) といった核廃棄物核種を、核反応により、安定 核種に変換する方法が核変換である。



核変換システムの設計研究においては、中性子を捕獲する反応(赤矢印)の起こり易さつまり中性子捕獲反応断 面積の高精度化は必須



中性子核反応測定装置 (ANNRI)を MLF に整備し、中性 子捕獲反応断面積等の核データについて高精度化に向 けた測定研究を実施している。

飛行時間法を用いた即発ガンマ線分析法

世界最高強度のパルス中性子と高効率 Ge 検出器、高速 DAQ、高効率遮蔽等の開発によって2つの非破壊元素分 析法を融合した新しい分析法の開発に世界で初めて成 功した。

新分析法では融合による相乗効果によって、どちらの手 法を用いても分析が困難である元素でも正確に分析出 来ることを実証した。





中性子光学基礎物理実験装置(NOP)

最先端の中性子光学技術を利用し、物質や宇宙の起源を探索する基礎物理学 実験のためのビームライン

特徵

- ビームライン上流において中性子ベンダーを用い3つのブランチに分岐する。
- 高速中性子を上流で落とすため遮蔽が必要なく、 広い実験スペースが確保可能
- 3 つのブランチでそれぞれ特徴的なビームが並行して利用可能

装置の仕様

- ビームラインは以下の3つのブランチに分岐されている。それぞれ以下の特徴がある。
- 非偏極: 大強度
- ●偏極:94~96%偏極
- 低発散: 低発散高輝度

中性子光学デバイス

- 精密ガスハンドリングシステム: 約 0.1% 精度で³Heの圧力制御
- ●ポータブル中性子 2 次元検出器:
 位置分解能~1 mm
- 超冷中性子生成用ドップラーシフター³⁾:
 速度 68 m/s の中性子を 180 度に反射可能。
- 永久磁石型中性子偏極装置:偏極度 > 99.9%

装置構成





CONTACT



Neutron Optics and Fundamental Physics (NOP)



主な利用例



得られる情報

- 中性子そのものの性質
- 中性子の崩壊
- ●中性子と物質の相互作用

ブランチ	ビーム サイズ (Y × X mm)	ビームフラックス (cm²s¹@1 MW)	ビーム発散 (Y×X mrad)	偏極度
非偏極	50 × 40	$(3.8 \pm 0.3) \times 10^{8}$	m=2相当	
偏極	120 × 60	$(4.0 \pm 0.3) \times 10^7$	23 × 9.4	94 ~ 96%
低発散	80 × 40	$(5.4 \pm 0.5) \times 10^4$	0.23 × 0.23	-
BL05 各ブランチのビーム条件				

- 中性子寿命の精密測定
- ●ドップラーシフターを用いたパルス超冷中性子発生
- 希ガスの中性子散乱による未知相互作用探索
- 冷中性子干渉計
- 超高分解能中性子検出器開発

超高分解能中性子検出器の開発 名古屋大学と共同で写真乾板 (エマルジョン) 技術を用 いた超高分解能の中性子検出器を開発

検出器原理:炭化ホウ素膜中のホウ素 10 が中 性子を吸収してイオンに変換し、イオンが写真 乳剤中に痕跡を残す。

中性子反応による粒子の飛跡を再構成することによ り最高で11 nm という従来の検出器よりも2 桁程度 良い分解能を得ることに成功



C. C. Haddock et al., Phys. Rev. C 100, 064002 (2019) (©2019 American Physical Society).

3)は用語解説(p.61)をご覧ください。

中性子共鳴スピンエコー分光器群 (VIN ROSE)

中性子散乱で最高のエネルギー分解能を有し、拡散現象などの動的性質を ナノ秒&ナノメートルスケールで観測できる中性子準弾性散乱装置

特徵

BL06

中性子準弾性・非弾性散乱

- パルス中性子源と共鳴スピンフリッパーを組み 合わせた世界で唯一の中性子スピンエコー分光 器
- ●他の手法では捉えられない分子・原子・電子ス ピンの動きを、ナノ秒スケールで分析可能

装置の仕様

- フーリエ時間:1ps~1ns
 (試料一検出器 1.2 m、最大実効振動数:200 kHz)
- 散乱角 2 θ = 0 ~ 15°
- 測定可能偏極反射率: R > 1.0⁻⁵
- 現在は MIEZE 分光器(オプション:偏極中性子 反射率測定)のみが利用可能です。ご希望の方は 必ず事前に装置責任者へお問い合わせください

試料環境機器

● 4 K GM 冷凍機



装置構成





CONTACT



Village of Neutron Resonance Spin Echo Spectrometers (VIN ROSE)



得られる情報

- 原子・分子の揺らぎの時間
- イオンなどの原子の動きを捉える

主な利用例

- 高分子・タンパク質・脂質膜・コロイド等のソフトマテリアルのダイナミクスの解明
- 偏極中性子解析を用いた磁性ナノ粒子の超常磁性⁴の解明
- プラスティックの粘弾性機能の解明
- 磁性体中のゆっくりとしたスピン運動の解明

Spectr meter	o Wave-le [A]	ength	Q range [Å-1]	Fourie Time	er ?
NRSE	5 < λ	< 20	0.02 < Q < 0.65	0.1 [ns] < t <	: 0.1 [µs]
MIEZE	3 < λ	< 13	0.002 < Q < 3.5	1 [ps] < t <	: 2 [ns]
(† BL07 (, BL05	side) Two cui	rved gui	ide N	RSE	



M. Hino et al., Physics Procedia 42, 136 (2013) (©2013 Elsevier).

MnSiの長周期磁気構造 スキルミオンの運動





T. Nakajima *et al., Phys. Rev. Res.* **2**, 043393 (2020). (©2020 American Physical Society)

4) は用語解説(p.61)をご覧ください。

超高分解能粉末中性子回折装置(SuperHRPD)

わずかな構造歪みを精度良く捉え、新しい構造物性を開拓する

特徵

- ピーク分離された多くの反射強度の観測が可能
- 対称性の低下に伴う僅かなピーク分裂の観測が 可能
- X線では困難な水素原子位置の決定が可能

BL08

中性子回折

● 強度、分解能の点で X 線との相補性を実現させ、 新しい構造解析法の開拓が可能

装置の仕様

- d範囲(標準セッティング)
 0.3~3.75Å(高角バンク:150°≦20≦175°)
 0.4~5.2Å(中角バンク:60°≦20≦120°)
 0.7~15Å(低角バンク:10°≦20≦40°)
- 分解能(∆d/d)
 最高分解能 0.0365% (@20≒172°)
 ≧ 0.08% (高角バンク)
 ≧ 0.35% (中角バンク)
 ≥ 0.7% (低角バンク)

試料環境機器

- 自動試料交換機(室温、10 試料)
- ヘリウム循環型冷凍機(4~300 K)
- Cryo furnace (5 ~ 800 K)
- 高温炉(~1223 K)
- ●1K冷凍機(0.9~300 K)
- ●マグネット (~14 T)

装置構成





高角検出器バンクと8mmPSDを用いた 高分解能検出器ユニット

CONTACT

鳥居周輝(装置責任者) torii@post.kek.jp



齊藤高志(副装置責任者) saitot@post.kek.jp



Super High Resolution Powder Diffractometer (SuperHRPD)



得られる情報

2 d/Å

- ●高精度の結晶・磁気構造解析
- ●極小構造歪みの検出

 $\Delta d/d = 0.0365\%$

主な利用例

- コバルト酸化物のスピン状態転移と巨大磁気体積効果⁵⁾
- 高ナトリウムイオン伝導体の高温構造解析
- 4d 酸化物磁性体の磁気相転移に伴う格子歪み
- ●ペロブスカイト型コバルト酸化物の室温付近での負の熱膨張⁵⁾



5)は用語解説(p.61)をご覧ください。



中性子回折

特殊環境中性子回折装置(SPICA)

高強度・高分解能中性子回折を実現、実電池のオペランド測定が可能

特徵

● 特殊環境中性子回折装置

- ●オペランド測定による蓄電池研究に特化した TOF型中性子回折装置
- 水素やリチウムといった軽元素を含む材料の精 密な構造解析
- 作動環境下での実デバイス内材料の構造変化観 測

装置の仕様

- *d* 範囲
 - 0.3 ~ 3.7 Å(背面バンク) 0.4 ~ 5.0 Å(特殊環境バンク) 0.5 ~ 11.0 Å(低角バンク)
- ・分解能(∆d/d):最高分解能0.09%

 0.12%(背面バンク)
 0.47%(特殊環境バンク)
 1.27%(低角バンク)

試料環境機器

- 自動試料交換器(室温,40 試料)
- トップローディング型 4K 冷凍機 (4~300 K)
- トップローディング型クライオファーネス (20~600 K)
- 5 軸、7 軸ゴニオ回折計
- 充放電評価システム



CONTACT	
森 一広(装置責任者) kmori@post.kek.jp	(3)
齊藤高志(副装置責任者) takashi.saito@kek.jp	3

装置構成___



19

Special Environment Powder Diffractometer (SPICA)





得られる情報

- 高強度・高分解能中性子回折データ。
- 動作中の蓄電池のオペランド回折データ。オペ ランド測定用に最適化された光学系が広い *d*-、 *Q*- レンジをカバーしている。
- ●併設された長期充放電システムの活用により、 オフビーム、オンビーム充放電が可能で、実験 室内で長期間にわたる構造変化の情報を取得で きる。



充電放電時での回折パターンの変化

オペランド測定による電池反応の解明

充放電しているリチウムイオン電池内部の不均一かつ非 平衡状態で進行する複雑な構造変化を原子レベルで解 析。

刻一刻と変化する電池反応を観測し、解明できる手法の 開発は画期的である。蓄電池の信頼性や安全性に関する 詳細な情報が容易に得られるため、リチウムイオン電池の さらなる高性能化だけでなく、全固体電池などの次世代 蓄電池開発にも大きく貢献すると期待される。



放電時と充電時で異なる反応機構を示すグラファイト負極

"Real-time observations of lithium battery reactions - operando neutron diffraction analysis during practical operation"

Taminato, et al., Scientific Reports, **6** (2016) 28843 (© 2016 Nature Publishing Group)

主な利用例

ヒドリド伝導体の構造科学

新たな電荷担体を伝導種とする固体電解質材料が出現した。軽元素であるヒドリドの構造科学推進には、軽元素に 敏感な中性子回折が不可欠である。



"Pure H⁻ conduction in oxyhydrides" G. Kobayashi, *et al., Science*, **351(6279)**, (2016), 1314–1317 (© 2016 AAAS)



中性子源特性試験装置(NOBORU)

J-PARC MLF の中性子源の特性を実測により検証し、施設安定運転に資する とともに、大強度・大面積ビームを利用できる汎用中性子実験ポート

特徵

- MLF で最も強固な遮蔽をもち、一辺 10 cm の鉄 ブロックでもフルビーム照射可能で、肉厚 3 cm の実験テーブルを備えており、ユーザーによる 様々な実験環境を構築可能
- MLF で最も線源に近い実験空間を有し、10 MeV 以上の高エネルギー中性子から、1 meV 以下の 冷熱中性子まで利用可能な大強度ガイド管レス のシンプルで安定なビーム光学系

装置の仕様

- L1 (モデレーター試料間距離):14.0 m
- 最大ビーム形状: 100 mm×100 mm
- 実験室空間:幅 2.5 m×長さ 3.5 m× 高さ 3.0 m
- 試料位置での熱冷中性子束: 4.8×10⁷ [n/s/cm²]
- 10 meV のピーク強度: 1.5×10¹² [n/eV/s/cm²]
- 10 meV のパルス幅(FWHM):33 [µs]
- 波長バンド幅:10.5 Å(シフト可能)



CONTACT



NeutrOn Beam-line for Observation and Research Use (NOBORU)





得られる情報

- 高品質大強度中性子ビーム提供のための中性子 源特性測定
- 中性子光学系、検出器開発などを含むテスト ポートとしての利用
- MLFにおける最大強度の高エネルギー中性子を 提供





主な利用例

大強度パルス中性子源の特性試験

● 白色中性子ホログラフィー法開発

● 高エネルギー中性子照射試験

● SEOP⁶⁾ 型偏極中性子デバイスの開発

超高分解能二次元中性子検出器の開発

- →世界最高性能の中性子特性を実証
- →機能性材料中の微少量添加物の観測
- →世界最高クラスの偏極率を実現
- → 超伝導素子を用い、ミクロンオーダーの実空間分解能をねらう
- → 半導体検出器や素子の中性子耐性評価



6)は用語解説(p.61)をご覧ください。



中性子回折

超高圧中性子回折装置(PLANET)

広い温度圧力範囲で、結晶・液体・ガラス物質の構造を精度よく調べる

特徵

- 6軸プレス「圧姫」を用いて、14万気圧1700℃ の高温高圧下での実験が可能
- 入射スリット、ラジアルコリメータにより、試料回りの物質からの散乱を除去し、クリーンな回折パターンを取得可能

装置の仕様

- 回折 分解能:△d/d=0.6%、d範囲:0.2~8.4Å ビームサイズ:1mm角~15mm角 ラジアルコリメータ:0.5mm、1.1mm、3mm
- ラジオグラフィー
 空間分解能:200 µm、視野:14 mm 角

試料環境

実験可能な温度・圧力範囲

- ●40万気圧、25~100℃(パリ-エジンバラプレス)
- ●14万気圧、25~1700℃(6軸プレス)
- ●14万気圧、30K~100℃(水戸システム)
- ●1万気圧、4K~室温(ピストンシリンダセル)





CONTACT



High-Pressure Neutron Diffractometer (PLANET)





得られる情報

- 中性子回折による高圧下における結晶・液体の 構造(原子位置、磁気構造)
- 中性子イメージングによる高圧下の試料の透過
 像



主な利用例

- 地球中心核の水素
- 低温高圧下での氷の構造多形
- 鉱物中の水素結合の対称化
- 液体・非晶質の圧力誘起構造変化

低温高圧下で新しい氷の相(氷 XIX)を発見

氷は、温度圧力条件により様々な結晶構造をとることが知られています。今回、氷 Ⅵ 相を冷却してできる相に関して、 これまで知られていた水素秩序氷(氷 XV)に加え、その高 圧側に新たな原子配列を持つ別の水素秩序氷(氷 XIX)が あることを発見しました。新たな相の発見は、2019 年以来 2年ぶりで、今後、氷の多形の包括的に理解に役立つと考 えられます。



R. Yamane *et al., Nature Commun.* **12**, 1129 (2021) (©2021 Springer Nature)

CS2の高圧分解によりできた新グラファイト物質

CS₂を加圧すると、約十万気圧で瞬時に硫黄とC₂Sに分解し、 それらは常圧下に回収できることがわかりました。得られた C₂Sをアニールして硫黄を取り除くと、sp² グラファイトシート に硫黄が結合したものであることが分かりました。これらは 高圧下で大量に生成できることから、グラファイトシートを 基にした電子デバイス設計に役立つと考えられます。



(左上)高圧下から回収した試料(中央の黒色物質)。(左下)推 測された生成物の構造。(右上)回収試料と層状カーボンの回折 パターンの比較。(右下)回収試料の二体分布関数。炭素シート に対応する位置に原子間距離のピークがみられる。

S. Klotz *et al., Carbon* **185**, 491 (2021) (©2021 Elsevier Ltd.)



高分解能チョッパー分光器(HRC)

高分解能で広くエネルギー・運動量空間を探査し、物質のダイナミクスを観測

特徵

- 高分解能フェルミチョッパー、高速 TO チョッパー で高エネルギー測定を実現
- スーパーミラーガイド管、大面積検出器で計測 数を増大
- 最小散乱角 0.6°の検出器により中性子ブリルア ン散乱測定を実現

装置の仕様

- 中性子エネルギー: 3 < Ei < 500 meV
- 散乱角: 水平: 3°∼62°(L2 = 4 m), $-31^{\circ} \sim -13^{\circ} (L2 = 4 m),$

 - $-5.1^{\circ} \sim -0.6^{\circ} (L2 = 5.2 \text{ m})$
 - 垂直: $\pm 20^{\circ}$ (L2 = 4 m), $\pm 4^{\circ}$ (L2 = 5.2 m)
- 中性子強度:(試料位置での中性子束@1MW) $1 \times 10^{5} \text{ n/s/cm}^{2}$ ($\Delta E/Ei = 2.5\%$) エネルギー分解能: △*E*/*E*i ≥ 2% (@E=0 meV) 最大試料サイズ:4×4 cm²

環境機器

- GM 冷凍機(T=4-300 K)
- ³He 循環型冷凍機(T = 1 300 K)
- 超伝導磁石(最大磁場 5 T、2 K 300 K)
- 圧力セル(シリンダータイプ、最大圧力 1.2 GPa)

装置構成





小角領域検出器





High Resolution Chopper Spectrometer (HRC)



主な利用例

得られる情報

q (Å⁻¹)

The Physical Society of Japan)

3

- 固体中のスピン・原子・分子の運動
- 強磁性体粉末からスピン波分散測定
- ●液体のフォノン分散測定

100

80

20

(Van 90 40



- 圧力誘起量子相転移と磁気状態の解明
- マルチフェロイック物質⁷⁾の磁気励起の解明
- ●一次元量子スピン系の磁気励起の解明
- 層状遷移金属酸化物の磁気励起の解明
- スクッテルダイト⁸⁾ 系の磁気励起の解明
- 金属反強磁性体の磁気励起の解明
- ●液体・多結晶系の格子振動の解明



冷中性子ディスクチョッパー型分光器(アマテラス)

磁性体・非晶質・液体など幅広い分野の研究に対して最適な分解能・強度を 実現する、低エネルギーに特化した準弾性・非弾性散乱装置

特徵

● 10⁻²~10² meV 領域のダイナミクス測定

BL14

中性子準弾性・非弾性散乱

- ●高効率ビーム輸送系、大面積検出器、異なるエネルギー範囲を同時に測定することで測定効率向上
- 高効率測定によりこれまで捉えきれなかった原 子・スピンの微小な動きを捉える

装置の仕様

- 入射エネルギー:1~80 meV
- エネルギー分解能: ΔE/Ei > 1% (Ei < 3 meV)
 ΔE/Ei > 2 ~ 3% (Ei < 20 meV)
 ΔE/Ei > 4 ~ 5% (Ei < 80 meV)
- 検出器:3.4°~116°(水平)、-16°~23°(垂直)
- 最適試料サイズ 1 φ×2 cm³

試料環境機器

- 無冷媒ボトムローディング型冷凍機(5~300 K)
- 無冷媒トップローディング型冷凍機(7~500 K)
- 高温スティック(T < 680 K)
- その他、共通機器も利用可能(一部使用条件に 制限がありますので、詳細は装置グループにお 問い合わせください)

装置構成









高速ディスクチョッパー 真空散乱槽内部と中性子検出器

CONTACT





Cold-Neutron Disk-Chopper Spectrometer (AMATERAS)





- Åオーダーの空間スケールで起こる 0.1 meV から数 10 meV の格子振動や磁気的励起などを観測できる
- 原子や分子の拡散・緩和的な運動について、運動の速さ (0.05 ps ~ 50 ps) や空間スケール (2 ~ 20 Å)、 構造との関係性を調べることができる

主な利用例

- 強相関電子系、量子スピン系における磁気励起や格子振動の解明
- 液体中の振動、拡散現象や非晶質の低エネルギーダイナミクスの解明
- 熱電材料など機能性材料の振動状態の解明
- 高分子や生体物質における分子の運動や柔らかさの解明





9) は用語解説(p.62)をご覧ください。



中性子小角・広角散乱装置(大観)

サブナノメートルからミクロンまでの空間スケールを広く見渡し、金属、磁性体、超伝導体、ソフトマター、生体高分子およびそれらの複合体等の構造と非平衡現象を解析

特徵

高い空間・時間分解能での小角・広角散乱の高効 率測定を最先端の中性子光学および検出技術により実現し、幅広い空間スケールの構造を解明する。

装置の仕様

利用波長範囲: 0.08~0.78 nm(非偏極中性子) 0.25~0.78 nm(偏極中性子)

q 範囲:

7×10⁻³~170 nm⁻¹(非偏極中性子) 7×10⁻³~25 nm⁻¹(偏極中性子)





試料交換機

試料環境機器

試料交換機、3K/4K冷凍機、1Tマグネット、 4Tクライオマグネット、10Tマグネット、 レオメータ、引張試験機、調湿装置、 レーザー加熱炉、ガス/蒸気吸着装置等

調湿装置





レオメータ



レーザー加熱炉(チャンバー部)と 加熱イメージ図

CONTACT

高田慎一(装置責任者) shinichi.takata@j-parc.jp	(JAEA)
廣井孝介(副装置責任者) kosuke.hiroi@j-parc.jp	(JAEA)
大石一城 k_ohishi@cross.or.jp	Øcross

Small and Wide Angle Neutron Scattering Instrument (TAIKAN)





得られる情報

- サブナノからミクロンスケールの構造情報
- ナノ磁性材料、生体材料、複合体の構造解析
- 非平衡現象の解明

主な利用例

- 小麦粉製品中のグルテンの階層構造の観察
- フェノール樹脂ゲル化過程における不均一構造解析
- タイヤゴム材料のナノ構造解析(水素核スピン偏極)
- 燃料電池電極用固体高分子材料の研究
- 鉄鋼材料中の微小析出物の解析
- 磁性材料のナノ磁気構造解析



岩瀬裕希,オレオサイエンス **16**,10(2016) (© 2016 日本油化学会).



散乱中性子のスピン状態は物質の磁気モーメントの方向によって変化するため、Spin-flip、Non-spin-flip 散乱を観測することにより磁気構造を決定する

R. Takagi *et al.*, Nat. Commun. **13**, 1472 (2022). (©2022 SPringer Nature)

フッ素フリーアイオノマー膜の高湿度 環境下での構造解析

プロトン伝導度の傾向(QP>MP>BP)と水クラスターの連結性の相関を明らかにする

sample:スルホン化炭化水素



(a) SPP-MP, (b) SPP-BP, (c) SPP- QP 膜の 80℃, 0-80%RH (D2O) における SANS パターン。モデル関数でフィッティング した結果



SPP-MP、SPP-BP、SPP-QP 膜の 80℃、80%RH での形態モデル図

K. Shiino, *et al., ACS Appl. Polym. Mater.* **2020**, 2 (12), 5558. (©2020 American Chemical Society)

BL16

中性子反射率

ソフト界面解析装置 (SOFIA)

ソフトマターを中心とした、物と物との境界である「界面」で起こる未知の 現象を解明する試料水平型の中性子反射率計

特徵

- 中性子の高い透過性や同位体を区別できる性質 を利用して、通常の方法では観察できない界面 のナノ構造を調べる。
- ●ビームを下に向けることで、固体界面だけでな く、気液界面・液液界面の構造も調べられる。

装置の仕様

- 大強度ビームによる短時間測定 全Q領域の測定に要する時間(目安) 気体/固体界面:1時間程度(50 mmφ) 液体/固体界面:1時間程度(75 mmφ) 気体/液体界面:20分程度(40×40 mm²) 液体/液体界面:6時間程度(20×40 mm²)
- 広い波長バンドによる広 Q 領域の同時測定 時分割測定用(時間刻み:数秒-数十分)
- 低バックグラウンド:R>10⁻⁷
- 自動測定プログラム(アライメント機能付)

多数の試料を設置可能



- 固体 / 液体界面測定用試料セル (リモートインジェクション可)
- 気体 / 液体界面測定用試料セル (Langmuir トラフも利用可)
- 液体 / 液体界面測定用試料セル



試料環境機器

CONTACT



装置構成

試料ステージ



©HAYASHI Yuki



得られる情報

- ●固体と固体や固体と液体、気体と液体など様々 な界面の膜厚やラフネスの評価
- 深さ方向に対して数ナノメートルからサブマイ クロメートルのスケールに渡る平均構造を観測 できる。



(ca. 2 nm)

ネマティック液晶のガラス表面における配向状態を観察 Soft Matter, 18, 545 (2022). ©2022 Royal Society of Chemistry



自動車用エンジンオイルの摩擦低減効果の解明 Tribol. Int., 167 (2022) 107365. ©2022 Elsevier Ltd.

主な利用例

- 溶媒中での機能性高分子の膨潤挙動
- 積層構造を有する有機デバイスの界面観察
- ●アニール過程における高分子薄膜の構造変化
- ●リチウムイオン電池の電極界面



有機太陽電池薄膜の深さ方向に対する相分離挙動 をX線との相補利用により解明 Soft Matter 7 (2011) 9276-9282. © 2010 Royal Society of Chemistry



される過程を経時変化観察 Langmuir 34 (2018) 15483-15489. © 2018 American Chemical Society



リチウムイオン電池の充放電による負極表面に おける被膜の形成過程をオペランド計測 ACS Appl. Mater. Interfaces 8 (2016) 9540-9544. ©2016 American Chemical Society



有機 EL の成膜プロセスの違いによる発光性能の 差を界面構造の違いにより説明 Adv. Mater. Interfaces 1 (2014) 1400097. © 2014 Wiley-VCH GmbH, Weinheim



中性子反射率

偏極中性子反射率計(写楽)

偏極中性子を利用することで磁化の構造を評価可能な反射率計

特徵

- ●わずかな角度で入射した中性子の反射率スペクトルを測定することで、薄膜状試料の層構造をナノメートルオーダーで評価。
- 偏極中性子を入射することで、磁性層中の磁化 の向きを評価。

装置の仕様

1. 主な仕様

- 測定 q 領域: 0.05 ~ 17.9 nm⁻¹ (非偏極) 0.1 ~ 8.19 nm⁻¹ (偏極)
- ●最大97%の偏極率
- 0 次元 3He 検出器
- MWPC 型 2 次元検出器

2. 試料環境

- ●1T電磁石、7T超電導磁石
- 4 K 冷凍機
- 液中測定セル
- 電気化学測定セル
- 試料ステージの自由度が高く、幅広い実験に 対応可能(光照射など)

試料環境機器

- 外部磁場(7Tまで)
- 温度(4K~室温)
- ●専用電気化学セル
- 恒温・恒湿チャンバー
- (温度 5~85℃、湿度 0~85%RH)
- 固体 / 液体界面測定セル



CONTACT青木裕之(装置責任者)
hiroyuki.aoki@j-parc.jp花島隆泰(副装置責任者)
t_hanashima@cross.or.jp

Polarized Neutron Reflectometer (SHARAKU)



得られる情報

- 固体と固体や固体と液体、気体と液体など様々 な界面の膜厚やラフネスの評価
- ●空間スケールはナノメートルからサブマイクロ メートル
- 界面での磁性とその深さ方向変化

主な利用例

- 高分子膜への吸湿プロセスの解析
- 高分子電解質中のプロトン伝導パスの解析
- トポロジカル絶縁体 / 強磁性体界面における磁気構造解析
- 電極界面における電気二重層の構造解析







深さを変えて測定



中性子回折

特殊環境微小単結晶中性子構造解析装置(千手)

モデルフリーで結晶構造・磁気構造を高精度に解明する

特徵

- 広い逆空間を効率的に測定し、水素原子位置や 複雑な磁気構造を決定
- 極低温や磁場などの複合特殊環境下での測定を 実現

装置の仕様

- 最大格子長:~ 50 Å
- 試料推奨サイズ:1×1×1 mm³ (@200 kW)
 > 0.5 × 0.5 × 0.5 mm³ (@1 MW)

复空試料

千手の概略

入射中性

● 検出器範囲:-13°~-167° +58°~+167°

2次元検出器

コリメータ

試料環境機器

- 室温測定用ゴニオメータ(1軸/2軸)
- GM/ パルス管冷凍機 (>4K)
- 2K 冷凍機(> 2 K、希釈冷凍機と組合せて > 50 mK)
- 3He 冷凍機(> 300 mK)
- マグネット(<7T、>2K、希釈冷凍機と組合せ可)
- ニオブ高温炉(< 1500 K)



千手の外観



装置構成

千手で得られる典型的な回折パターン

CONTACT	
大原高志(装置責任者) takashi.ohhara@j-parc.jp	(JAEA)
鬼柳亮嗣(副装置責任者) ryoji.kiyanagi@j-parc.jp	(JAEA)
中尾朗子(問い合せ先) a_nakao@cross.or.jp	©cross

Extreme Environment Single Crystal Neutron Diffractometer (SENJU)





得られる情報

- 巨大結晶が得られない試料の構造解析
- ●低温、磁場等の特殊環境下での構造-機能相関





主な利用例

- 微小有機単結晶の中性子構造解析
- 有機誘電体中のプロトンの秩序 無秩序転移の観察
- 重い電子系物質が示す複雑な磁気構造の解明
- 材料中の組織構造の分析



(© 2016 IUCr)

(© 2015 John Wiley & Sons)



中性子回折

工学材料回折装置 (匠)

材料工学における実用材料等の内部応力、組織等に係る様々な課題を解決する

特徵

- 直行 2 方向以上の散乱ベクトル(左の情報)の 同時測定
- 短時間・高精度での測定
- 測定部位を絞り、試料をスキャンすることで、 格子ひずみ等の分布を測定
- 変形試験機、低温装置(10 K~)、
 高温装置(~1000℃)など、豊富な試料環境

装置の仕様

- 分解能 △*d/d*: 0.17~0.4%
- *d* 範囲: 0.05 ~ 0.29 nm (標準)、 0.05 ~ 0.50 nm (広範囲)
- 試料ステージ:700×700 mm、耐荷重~1t
- ラジアルコリメータ:1mm、2mm、5mm
- ●マッピング測定
- 様々な環境でのその場測定

試料環境機器

- ●標準引張試験機(50 kN、引張、圧縮)
- 高温引張試験用高温炉(1273 K)
- 液体窒素低温引張試験システム(100 K 473 K)
- 極低温引張試験機(50 kN, 10 K 220 K)
- 疲労試験機(60 kN, < 30 Hz)
- 小型試料用高温引張試験機(25 kN, 1273 K)
- 熱膨張測定機(1273 K)
- オイラークレイドル
- 電場印加装置、熱風機、サーモグラフィカメラ



37

Engineering Materials Diffractometer (TAKUMI)





● 格子ひずみ(応力)、結晶欠陥(転位、結晶子サ イズ等)、集合組織、相分率、相変態



主な利用例

- 鉄鋼、軽金属材料の変形(室温、低温及び高温)中のその場解析による変形機構、機能発現機構 等の解明
- 金属材料の加工・熱処理過程中のその場解析による組織制御プロセスの解明
- 金属構造物の残留ひずみ・応力分布測定
- 岩石、コンクリート、セラミックスなどの非金属材料の格子ひずみ等の評価



d allere ma ar an ar ar terminal T Hemmi et al., Superconductor Science and Technology 26 084002 (2013) (©2013 IOP Publishing) ● 高磁場部 HF7 では座屈等による熱応力の緩和がみられた 製造過程の模擬試験 evaluation breakthrough mech.

38



中性子回折

茨城県材料構造解析装置(iMATERIA)

広d(格子長)領域での回折及び小角散乱の迅速かつ高精度な測定が可能な汎用 中性子散乱装置

特徵

- 高分解能粉末回折機能
 - 粉末材料の結晶構造解析
 - ・ 自動試料交換機構 (ロボット) による連続迅速測定
- 小角散乱機能
 - 多成分系材料のナノ構造解析
 - 動的核スピン偏極によるナノ構造解析
- 広角検出器配置機能
 - マルチスケール構造解析
 - ・細分化したバンクによる結晶配向(集合組織)解析
 - 全散乱機能による局所構造(結晶PDF、非晶質構造)解析

装置の仕様

- 測定領域: 0.2 < *d* < 2000 Å
- 分解能:△d/d~0.16%(高分解能バンク)
- ●標準測定時間:目安となる時間*
 粉末回折 10 min@500 kW
 - (Li 電池正極材料)
 - 集合組織 7 min@500 kW (鉄鋼材料)
 - 小角散乱 5 min@500 kW (高分子材料)
 - * 試料の構成元素や組成、測定目的等により異なる。

試料環境機器

- 試料交換機構(室温・常圧・真空)
- 真空高温炉(RT~900℃)
- 雰囲気制御高温炉(RT~1000℃)
- 冷凍機(-270℃~RT、RT~400℃)
- 急速加熱冷却装置
 - (RT~1000℃、昇温 : 10 K/s、降温:20 K/s 以上)
- 高温万能変形試験機(RT~1000℃、最大荷重:50 kN)
- 小角散乱用試料交換機
- 核スピン偏極用超電導マグネット(7T)



IBARAKI Materials Design Diffractometer (iMATERIA)





主な利用例

- 全固体型リチウムイオン電池用の固体電解質開発
- 充放電時のリチウムイオン電池用電極材料の結晶構造変化の動的測定
- 光触媒コーティング液の開発
- 燃料電池用白金代替触媒の開発
- 架橋網目構造の解析による高性能ゴム材料の開発
- 洗剤泡沫の構造及び崩壊過程の解明による界面活性剤の開発
- 鉄鋼材料の集合組織の迅速測定

1070

± ⊐jone

973 g

73 👮

- 鉄鋼材料の相分率(残留オーステナイト量など)の高精度測定
- ●熱処理工程における鉄鋼材料の微細組織構造変化の動的観察



得られる情報

- 結晶構造解析
- ナノ構造解析
- ●結晶配向解析(集合組織)
- ●局所構造解析(結晶、非晶質)



a 200



1分毎の時分割データとして、Rietveld 解析により

正極・負極の構造変化を解析可能





鉄鋼材料の微細組織制御工程を模擬した

環境下でのその場中性子回折測定

急速加熱冷却装置による相変態挙動の測定

<u>3 40</u>

§ 30

<u>े 20</u>

室温 (a) 及び高温 (b) での引張変形 に伴う(011)と(111)配向度の変化

1000 4500 5000





高温引張変形時に見られる応力の振動 に対応した集合組織変化を観測



中性子回折

高強度全散乱装置(NOVA)

結晶から、液体、非晶質まで構造解析可能な中性子全散乱装置

特徵

- 世界最高レベルの高強度を利用した中性子全散 乱測定および粉末回折測定
- 広い運動量遷移空間の測定(高い実空間分解能)

装置の仕様

- Q 領域: 0.03~100 Å⁻¹ (d 領域: 0.06~200 Å)
- 最高 Q 分解能: △Q/Q~0.35 %
- 散乱角 2*θ*: 0.7°~170°
- 標準試料体積:直径6mm×高さ20mm (約0.6cc)

試料環境機器

- 自動試料交換機(SC) 試料数:40(室温)
- 温度制御型試料交換機 (TSC) 試料数:18、温度:20~700 K
- ●トップローディング型クライオスタット(TLC) 温度:5~700 K
- 非弾性散乱測定用フェルミチョッパー 分解能:5~20%
- 2K クライオスタット (MLF 共通 SE) 温度:1.8 ~ 300 K
- ³He クライオスタット(MLF 共通 SE) 温度:0.3 ~ 300 K



CONTACT



High Intensity Total Diffractometer (NOVA)



得られる情報

- 水素等の原子位置や磁気構造とその変化
- 最隣接原子間距離からナノメートル程度の構造 変化
- 非晶質や液体などの揺らぎ系の構造解析



主な利用例

- 少量試料の中性子回折測定による結晶・局所構造
- その場測定による短時間の構造変化
- その場測定による低温 / 高温・(ガス) 圧力下の構造変化
- 同位体置換を利用した固体・液体の局所構造



同位体置換による 0.9 ("S₈)0.069(CS₂)0.931 CS₂ 溶液中の硫黄 0.8 分子の局所構造の 0.7 解明 0.6 0.5 34S (+0.4) 0.4 Y. Kameda *et al., Bull*. 0.3 ð(Q) (+0.2) Chem. Soc. Jpn., 95, ĝ 0.2 0 1481 (2022) nats (© 2022 The Chemical -0.1 Society of Japan). ð(Q) (-0.2) -0.2 -0.3 -0.4 -0.5 0.6 8 12 16 20 24 28 32 36 40 OAintra *5-*5 nter *S-CS. (J)SO long-range 1 2 3 4 5 1Å 6 7 8 9

BL22 エネルギー分析型中性子イメージング装置(螺鈿)

中性子透過率のエネルギー依存性の解析により、試料内部の形状、結晶情報、 元素情報、磁気情報を可視化

実施可能なイメージング手法

- エネルギー分析型中性子イメージング ブラッグエッジイメージング 共鳴吸収イメージング 偏極中性子イメージング 位相イメージング
- 中性子ラジオグラフィ・トモグラフィ

装置の仕様

- ●利用波長範囲:λ < 8.8 Å(L=18 m, 25 Hz)
- 波長分解能(Δ λ / λ): 0.2%
- ・中性子強度(試料位置での中性子束@1 MW):
 1.1×10⁸ n/s/cm²(E < 1 MeV、L/D=180)

- ビームサイズ:< 300×300 mm²
- 空間分解能: 30 ~ 300 µm
- ●コリメータ比(L/D)180~7500

試料環境機器

- ●フィルター (Cd、Bi、Pb、BK7)
- 試料ステージ (大型:耐荷重 1.0 t、中型:耐荷重 650 kg、小型: 耐荷重 10 kg)
- 試料加熱装置(抵抗加熱、赤外線ヒーター)
- 偏極度解析システム (偏極ミラー、磁気シールドボックス、直流電源)
- 中性子 Talbot-Lau 干渉計
- 水素ガス供給·希釈装置(最大 H₂ 流量 10 L/min)



T. Shinohara et al., Rev. Sci. Instrum. 91, 043302 (2020). (© AIP Publishing LLC)



Energy Resolved Neutron Imaging System (RADEN)





得られる情報

- ラジオグラフィ・トモグラフィ 非破壊内部観察、欠陥探査、液体挙動
- ブラッグエッジイメージング 結晶組織情報、歪み分布
- ・ 偏極中性子イメージング
 磁場情報
- 共鳴イメージング 元素情報及び温度

日本刀の中性子 CT 再構成像



Y. Matsumoto, et al, Materials Research Proceedings 15 (2020) 221-226. (© 2020 Materials Research Forum)

自動車部品の中性子 CT 再構成像



観察対象例

- ラジオグラフィ:熱交換器内の冷媒、植物の根、燃料電池内の生成水等の挙動、機械部品の欠陥探査、 in situ/in operand での撮像
- CT:機械部品、植物、コンクリート、考古学試料
- ブラッグエッジ法:鉄鋼・金属材料、機械部品、考古学試料
- 共鳴吸収法:リチウムイオン電池、シンチレータ材料、鉱物試料
- ●磁気イメージング法:モーター、電磁鋼板、トランス、磁石材料
- 位相(干渉) イメージング法:金属 3D プリンティング材料、磁石材料

主な利用例

3D 偏極度解析トモグラフィによるソレノイドコイル中の磁場の3 次元分布



M. Sales et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 205001 (2019) (© 2019 IOP Publishing).

ブラッグエッジイメージングによる焼入れ処理歯車の結晶組織構造分布







中性子準弾性 • 非弾性散乱

偏極中性子散乱装置(POLANO)

原子・分子におけるスピン、軌道、格子などの物理自由度のダイナミクスを分離して 観測することにより、物理現象の本質を明らかにする中性子非弾性散乱装置

特徴

- 飛行時間法の偏極中性子散乱を実現
- 世界最高エネルギー 100 meV の偏極度 解析を目指す
- 広い運動量空間における測定を実現

装置の仕様

- 偏極:1 meV < *E*i < 100 meV (目標値)
- 検出器角度範囲:水平:-20°~120° 垂直:-8°~8°
- エネルギー分解能 Δ*E/E*i ≥ 2 ~ 4% @*E*=0
- 運動量分解能(△Q/ki):1~2%
- ビームサイズ: 20×20 mm² (最適値)
- 現在の一般利用は非偏極のみ(偏極実験は 装置担当者にご相談ください)

試料環境機器

- GM トップロ─ディング冷凍機 (T = 4 - 300 K)
- GM ボトムローディング 7K 冷凍機 (T = 7 -300 K)



CONTACT

橫尾哲也(装置責任者) tetsuya.yokoo@kek.jp



伊藤晋一(副装置責任者) shinichi.itoh@kek.jp



Polarized Neutron Spectrometer (POLANO)





ミュオン物質生命科学実験装置 (Muon D1)

ミュオン素粒子の磁石の性質を利用して物質内部の局所磁場を検出。高運動量までのビームが利用可能であり、高い透過能力を活かした高圧実験や負ミュオンによる内部磁場観察が可能

特徵

ミュオンスピン回転緩和共鳴

- 運動量可変パルス正負ミュオン利用の µSR 実験 装置
- 圧力・極低温など様々な複合環境下での測定に より多種多様な現象に対応

装置の仕様

- ビーム性能 27 ~ 90 MeV/c の正負ミュオン シングルパルス (表面ミュオン) またはダブルパルス運転
- 試料環境 温度 0.05 1000 K 磁場 0 – 0.4 T(ビーム方向) 0 – 0.01 T(ビームと垂直方向) フラッシュランプによるパルス光照射

試料環境機器

- Oxford トップロ―ディング希釈冷凍機 (T = 0.05 - 30 K)
 Oxford 熱伝導型ミニクライオ (T = 4 - 500 K)
- ●赤外炉 (T=300-1073 K)

装置構成





高温炉

希釈冷凍機



Muon Apparatus for Materials and Life Science Experiments





D1

得られる情報

- 内部磁場観察に基づく固体および液体中の磁気 状態と電子状態
- 物質中の微量水素の電子状態
- 電子・水素・イオンのダイナミクス

主な利用例

- 超伝導体におけるクーパー対の対称性の解明
- 超伝導体における磁束格子の解明
- 半導体中の微量水素の電子状態の解明
- 量子臨界転移近傍における磁性の解明
- 固体内のイオン拡散挙動の解明
- 負ミュオンスピン回転緩和によるイオン拡散種の解明







Phys. Rev. Lett. 121, 057002 (2018). (© 2018 Amerian Physical Society)

ミュオン基礎科学実験装置 (Muon D2)

世界最大強度の正負ミュオンビームを利用し、素粒子としてのミュオンの性質、ミュオニック原子の構造や核反応、考古学資料・希少試料等の非破壊元素分析等に関する研究を行う装置



装置構成



元素分析セットアップ(Ge 検出器と金貨の資料)

CONTACT

梅垣いづみ(装置責任者) umegaki@post.kek.jp



ストラッサー パトリック (副装置責任者) patrick.strasser@kek.jp



D2 実験エリアのオープンスペース

ミュオン基礎科学実験・ 負ミュオンX線元素分析





得られる情報

- 元素分析(負ミュオン特性X線分析装置利用)
- 半導体ソフトエラー(ユーザー持込装置)
- その他ミュオンに関する物理量等(同上)



主な利用例

- 宇宙線ミュオンを模擬したミュオン照射による半導体ソフトエラーの再現
- 負ミュオン特性X線による非破壊元素分析(考古学資料・隕石・電池等)
- ミュオンの稀崩壊現象の観察



大強度ミュオンビーム実験装置 (Muon H1)

大強度ミュオンを用いた実験

H1

大強度パルスミュオンビームを用いて、基礎物理などの様々な実験的研究を高精度・高 感度で行う

特徵

- 大強度で運動量可変な正負パルスミュオンビー ムを利用可能
- ユーザー装置を持ち込み、長期ビームタイムで 高統計を必要とする実験が可能
- 6.2m(D)×5.7m(W)×3.5m(H) のオープンスペース
- 床を除く全ての面に鉄板による磁気遮蔽
- パッケージ空調による温調

装置の仕様

- ビームの種類 表面正ミュオン、クラウド正負ミュオン
- ●ビーム運動量 約10~120 MeV/c
- ●ビーム強度 10⁸ µ⁺/s@28 MeV/c、4×10⁷ µ⁻/s@50 MeV/c、 1 MW 時
- ●ビーム構造 ダブルバンチ 25 Hz バンチ幅 100 ns、バンチ間隔 600 ns
- 実験機器 ユーザー機器の持込が可能

試料環境機器

● 基本的にオープンスペース







ビームポート

CONTACT





得られる情報

- ミュオンに関する基礎物理量(ユーザー持込装置)
- 素粒子標準理論を超える新物理(同上)

主な利用例

- ミュオニウム超微細構造の精密測定
- ミュオン 電子転換過程の探索



Magnet

Spectrometer

汎用 µSR 実験装置(ARTEMIS)

素粒子ミュオンの磁石としての性質を利用して物質内部の局所磁場を検出 表面ミュオン専用なので、高い計数速度を利用した微小試料測定や反応過程測定も可能

特徵

- 運動量固定のパルス正ミュオン利用の µSR 実験 装置
- 検出器は D1 と同様の性能

S1

ミュオンスピン回転緩和共鳴

装置の仕様

- ●ビーム性能
 - ・27 MeV/c の正ミュオン
 - •800 kW シングルパルス・ダブルパルスの 両モードで運転可能
- ミュオン強度

装置構成

- *ϕ*25 mm 試料: ダブルパルス運転で 180 M events/hour、 シングルパルス運転で 90 M events/hour
- *φ*10 mm 試料: ダブルパルス運転 60 M events/hour、 シングルパルス運転 30 M events/hour

試料環境機器

- Oxford ³He 冷凍機(T = 0.3 ~ 30 K)
- Oxford 熱伝導型ミニクライオ(T=4~450 K)
- 赤外炉(T = 300 ~ 1073 K)





赤外炉



3He 冷凍機

CONTACT

中村惇平(装置責任者) jumpei.nakamura@kek.jp



西村昇一郎 (副装置責任者) nishimu@post.kek.jp



General purpose µSR spectrometer (ARTEMIS)





S1

得られる情報

- 内部磁場観察に基づく固体および液体中の磁気 状態と電子状態
- 物質中の微量水素の電子状態
- 電子・水素・イオンのダイナミクス

主な利用例

- 超伝導体におけるクーパー対の対称性の解明
- 超伝導体における磁束格子の解明
- 半導体中の微量水素の電子状態の解明
- 磁性材料の合成反応過程の解明
- 固体内のイオン拡散挙動の解明
- In operando 測定による反応機構の解析





Δは µSR で決めた核磁場分布幅

Sustainable Energy & Fuels 3, 956 (2019). (© 2019 Royal Society of Chemistry)





ミュオニウムレーザー物理実験装置(Muon S2)

ミュオン基礎科学実験

レーザーを用いたミュオニウムのエネルギー準位精密測定、あるいはミュオニウムの3光 子イオン化による超低速ミュオン生成を行う

特徴

- 表面正パルスミュオンビームを利用可能
- ユーザー装置を持ち込み、長期ビームタイムで高 統計を必要とする実験が可能
- レーザーを使った実験のために、完全密閉された エリアを使用可能

装置の仕様

- ●ビーム性能
 - ・27 MeV/c の正ミュオン
 - シングルパルス・ダブルパルスの両モード で運転可能(S1エリアとの連携が必要)
- ビーム強度

装置構成

・~3×10⁶ μ⁺/s(シングルパルス)、760 kW 時

試料環境機器

- 基本的にオープンスペース
- エリアサイズ
 - •長さ:5.0 m
 - •幅:3.8 m
- ◆ 高さ:2.8 m
- ユーティリティ
 - 冷却水
- ◆ 電気
- F 居縮空気・排気



IPRICH IP

CONTACT



中村惇平(副装置責任者) jumpei.nakamura@kek.jp



Muonium Laser Physics Apparatus





56



超低速ミュオン顕微鏡実験装置 (U1A)

極微の方位磁石で表面・界面の磁性を解き明かす高時間分解・深度分解プローブ

特徵

- 熱ミュオニウムのレーザー共鳴イオン化による 超低速ミュオン
- 表面ミュオンの 1/1000 程度の打ち込みエネル ギー
- パルスビームでありながら連続ビームに匹敵する時間分解能
- 通常の表面ミュオンビームの 1/10 程度のビーム サイズ

装置の仕様

- 低速化した正電荷ミュオン (µ+)
- エネルギー: 0.5 keV ~ 30 keV (可変)
- エネルギー幅: 50 eV 程度 (FWHM)
- ●時間分解能:1ns(Std.dev.)
- ビームサイズ:1.6 mm (Std. dev.)
- 512 チャンネルの陽電子検出器

試料環境機器

- ヘリウム冷凍機:4.2 K~300 K
- 静磁場:0.14 T (最大)
- 電流導入、電圧印加
- 試料輸送用ロードロックチェンバー
- RHEED 装置



高電圧ステージ

ミュオンスピン分光器

CONTACT





得られる情報

- 内部磁場観察に基づく固体試料中の磁気状態お よび電子状態とその深度依存性
- 物質中の微量水素の電子状態
- 物質中の電子・水素・イオンのダイナミクス
- 低エネルギーのミュオンと物質との相互作用

主な利用例

- 通常のµSR では難しい薄膜試料・微小試料の磁性研究
- 超伝導体の磁場侵入長の決定など深度分解能の必要なµSR 測定
- 界面で発現する超伝導の研究など物質内部を選択的に観察するµSR 測定
- 低エネルギーのミュオンおよびミュオニウムの素過程に関する研究



SiO2/Pt/SiO2/Pt 多層薄膜試料の USM - µ SR



中性子実験装置

	機器名	概要	
低温	GM クライオファーネス	温度範囲:5~750K	
	2Kクライオスタット	温度範囲:1.7~250 K	
	³ He 冷凍機	温度範囲:0.3~300 K	
	希釈冷凍機	追 定範囲: 100 mK ~ 40 K 組み合わせ機器:7T超伝導マグネット,2Kクライオスタット	
	ニオブ高温炉	温度範囲:室温~1500℃(真空), 室温~1000℃(ヘリウムガス中)	
高温	小角、反射率用電気炉	小さな窓のヒーター 散乱角±15°をカバー 温度:室温~1000℃(真空),室温~900℃ (ヘリウムガス中) 大開口角のヒーター 散乱角±40°をカバー 温度:室温~800℃(ヘリウムガス中)	
縦磁場7T超伝導	縦磁場7T超伝導マグネット	最大磁場:7T(-7Tで逆磁場)縦磁場 温度範囲:3~300K	
強磁場	パルスマグネット	最大磁場:30T(maximum) 試料温度:3K(minimum) 繰り返し時間:数分毎	
	キセノン光源	300 W	
	水銀光源	250 W	
光照射	LED 光源	367 nm (FWHM: 9 nm), 0.53 W408 nm (FWHM: 11 nm), 1.34 W441 nm (FWHM: 18 nm), 0.62 W521 nm (FWHM: 44 nm), 0.50 W	
	中性子同時測定用ラマン分光器	励起レーザー波長:785 nm	
高圧	Paris-Edinburgh pressure cell	加圧方式 対向アンビルセル 最大印加荷重 130 tonf 温度:室温 最高発生圧力:20 GPa(実験条件による。要事前相談)	
	自動調圧用シリンジポンプ	パリエジンバラセル加圧用	
引張	二軸引張試験機	最大荷重 50 kN 取付可能試験片サイズ:全長 130 mm 以上(十字形試験片の場合) 厚さ 0.5 ~ 10 mm	
	長期変形(疲労)試験機*	荷重:引張圧縮 50 kN, 0.01 ~ 100 mm/min 温度:室温	



* 準備中

中性子実験装置

	機器名	概要
ソフトマター	レオメーター	測定温度:-50~150℃ トルク:1 nNm~200 mNm
	高精度ガス / 蒸気吸着量測定装置	吸着質: N_2 , Ar, H_2O , D_2O など
調湿	重水軽水混合調湿ガス発生装置 (2つの調湿ガスラインと二温度法によ る露点制御)	生成露点(-15 ± 0.2)℃dp から(+85 ± 0.2)℃dp 最大流量 3 L/min 使用実績BL:02, 14, 15, 17
	分流方式調湿ガス発生装置 (乾燥ガスとの混合による相対湿度制御)	生成露点 -36℃dp から +85℃dp, 精度± 1%RH@23℃ 最大流量 1 L/min 使用実績BL:02, 15, 16, 17

ミュオン実験装置

	機器名	概要
低温	ミニクライオ マイクロスタット	温度範囲:5~370K 温度範囲:4~450K
	無冷媒希釈冷凍機	最低温度:90 mK 最大試料空間:40 mm Φ
	縦型冷凍機	温度範囲:2~300 K
	³ He 冷凍機	温度範囲:0.3~30 K
高温	高温炉	温度範囲:300~1000 K
強磁場	縦磁場電磁石	磁場仕様:0~0.35 T
	横磁場電磁石	磁場仕様:0~0.0125 T
	小型横磁場コイル	磁場仕様:0~0.04 T
	U1A 電磁石	磁場仕様:0~0.12T

1)フラストレート量子磁性体

BL01 / 6頁 BL12 / 26頁

幾何学的配置や逆の効果をもつ相互作用の競合によって、スピン間に働く 全ての相互作用エネルギーを最低にすることができない状況にある磁性体を フラストレート磁性体という。

抜粋: J-PARCプレスリリース https://www.j-parc.jp/c/press-release/2019/10/19000342.html

2) 遍歴磁性体

用語解説

BL01 / 6頁

一般的に固体中の電子は、結晶全体に広がって自由に動き回る「遍歴状態」 と、原子周囲に束縛された「局在状態」の二種類に分類される。

希土類やアクチノイド化合物におけるf電子は、この「遍歴状態」と「局在 状態」の中間的な性質を持っており、非常に複雑で奇妙な振る舞いを示す。 抜粋:SPring-8プレスリリース http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release /2007/070901/

3) ドップラーシフター

BL05 / 13頁

BL05 - NOP ビームラインでは、超冷中性子(UCN - ultra-cold neutron)に よる中性子光学デバイス研究や UCN 検出器開発のため UCN ドップラーシフ ターを装備している。UCN ドップラーシフターは、高反射率を有する中性子 スーパーミラーを入射中性子速度の 1/2 で入射中性子の進行方向に移動させ、 そのスーパーミラーで反射した中性子が速度を失うことにより UCN 化させる 装置である。

抜粋:KENS月例報告 https://www2.kek.jp/imss/kens/topics/2014/04/111232.html

4) 超常磁性

BL06 / 16頁

ナノ粒子の磁気エネルギーは非常に小さく、周囲の熱エネルギーによって 磁化の向きがたやすく乱されてしまう。このため、ひとつひとつのナノ粒子 が強磁性(磁化)を持っている場合でも、異なる粒子間では磁化の向きはばら ばらになろうとする。この状態を超常磁性とよぶ。

抜粋: SPring-8プレスリリース http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_ release/2004/040909/

5) 巨大磁気体積効果と負の熱膨張

BL08 / 18頁

負の熱膨張の起源となっているのは、磁気秩序の消滅に伴う体積収縮、いわゆる磁気体積効果である。 抜粋:日本中性子科学会第7回年会予稿集

6) SEOP (spin-exchange optical pumping)

BL10 / 22頁

³He スピンフィルターは、エネルギーにして冷中性子領域から熱中性子領域 の中性子を偏極することができることに加えて、ガスであるため自由な形状に でき広い中性子散乱角度をおおうことができるというメリットを持つ。SEOP (spin-exchange optical pumping) 法では、光ポンピングによりルビジウム等 アルカリ金属原子の最外殻電子を偏極させ、これと³He の原子核がスピン交 換をすることにより³He 核偏極を実現する。

抜粋:KENS月例報告 https://www2.kek.jp/imss/kens/topics/2012/12/071914.html

7) マルチフェロイック物質

BL12 / 26頁 BL23 / 46頁

誘電性と磁性が構造を通じて結合し、磁気的性質と電気的性質が相互に結びついている物質であり、様々な電子デバイスへの応用が期待される。 抜粋: J-PARC 研究成果 https://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/result/2012_05.html

8) スクッテルダイト

(BL12 / 26頁)

ノルウェーのオスロ北西部にある地名(Skutterud)で、この構造を持つ 化合物 CoAs₃ が発見されたことに由来する名前。化学式は、 RxT_4X_{12} (R: 金属、 T: 遷移金属、X: プニコゲン)で表される。元素の組み合わせにより、超伝導、 半導体性、価数揺動など、さまざまな特性を示すことが知られている。 抜粋:理研プレスリリース https://www.riken.jp/press/2011/20111102/index.html

9) バロカロリック効果=圧力熱量効果

BL14 / 28頁

熱量効果とは、例えば磁性体が磁場により強磁性体から常磁性体へ相転移 したり、誘電体が電場により強誘電体から常誘電体へ相転移するなど、外的 要因により材料が発熱や吸熱をする現象。圧力熱量効果とは、そうした吸熱 や発熱を伴う相転移が圧力によって誘発される現象をいう。

抜粋:J-PARCプレスリリース https://j-parc.jp/c/press-release/2019/03/29000233.html

*利用相談を希望される方は「利用相談窓口」へ メールでお問い合わせ下さい。 利用相談窓口:J-PARC センターユーザーズオフィス j_proposal@ml.j-parc.jp

利用案内

○ J-JOIN ウェブページ:https://jrr3ring.jaea.go.jp/jjoin/



○ MLF ウェブページ:https://mlfinfo.jp/ja/

 J-PARC センターユーザーズオフィス 〒319-1106
 茨城県那珂郡東海村大字白方 162-1
 いばらき量子ビーム研究センター1階



〈J-PARC 物質・生命科学実験施設〉

中性子実験装置

ミュオン実験装置







発行: 登録施設利用促進機関 一般財団法人総合科学研究機構 中性子科学センター

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビーム研究センター内 Tel. 029-219-5300 (代表) URL https://neutron.cross.or.jp/ja/



J-PARC

2023年8月