



資料1
科学技術・学術審議会
大強度陽子加速器施設評価作業部会（第2回）
令和5年11月24日

令和5年度 J-PARC中間評価

第2回 作業部会

前回中間評価以降の主な成果

令和5年11月24日

J-PARCセンター

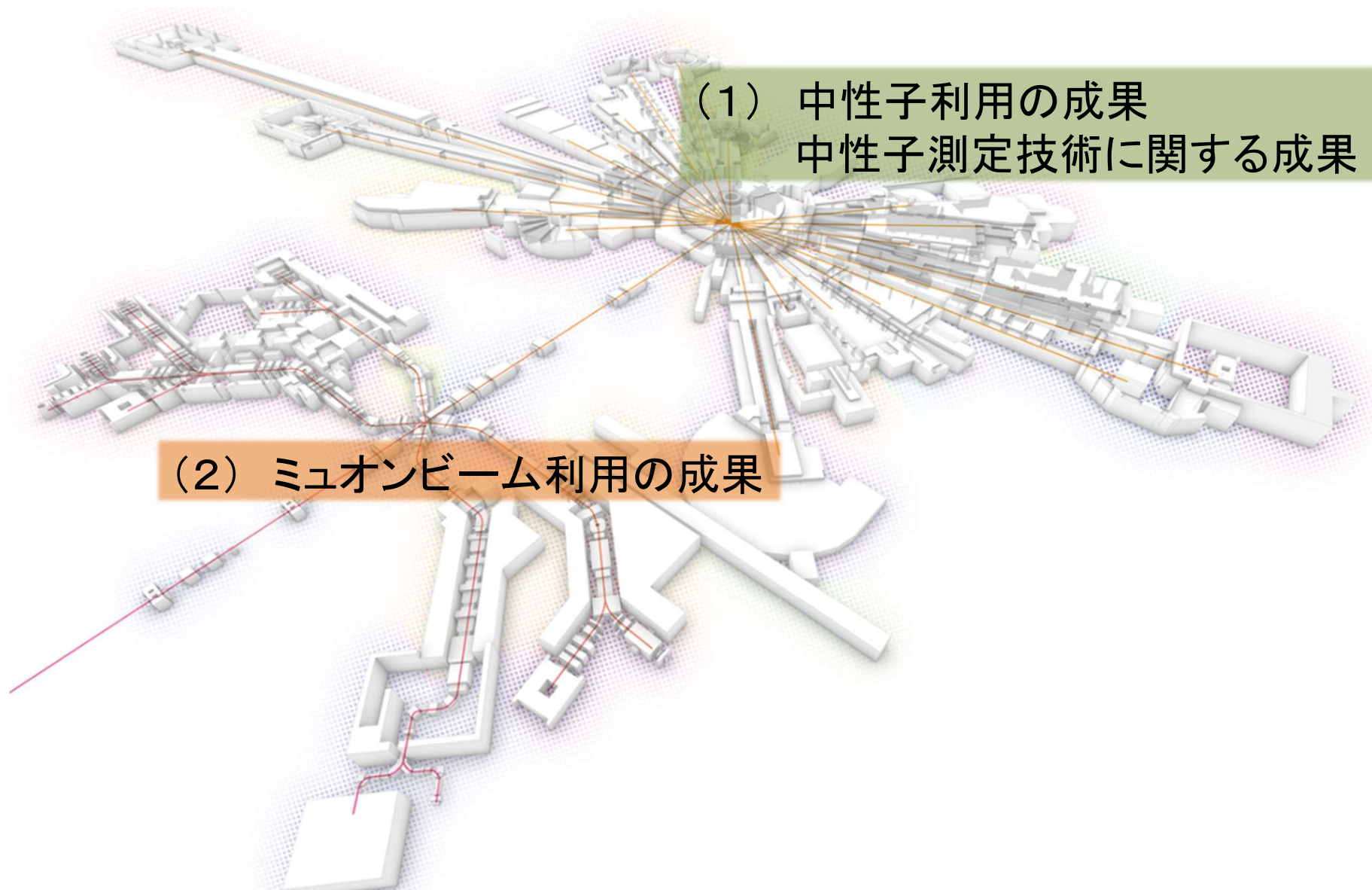
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
一般財団法人 総合科学研究機構 中性子科学センター



前回中間評価以降の主な成果

1. 物質・生命科学実験施設(MLF)における主な成果
 - (1) 中性子利用の成果、中性子測定技術に関する成果
 - (2) ミュオンビーム利用の成果
2. ハドロン実験施設における主な成果
3. ニュートリノ実験施設における主な成果
4. 核変換実験施設に向けた主な成果
5. まとめ

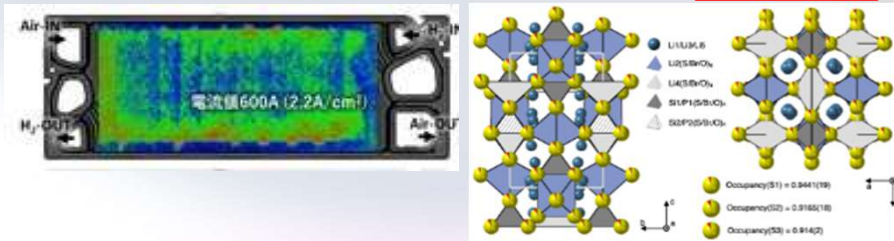
1. 物質・生命科学実験施設(MLF)における主な成果



(1) 物質・生命科学実験施設 中性子利用研究成果

エネルギー科学

- ◆ **固体冷媒を用いた新しい冷却技術の開発**に期待
柔粘性結晶の巨大圧力熱量効果 **【成果例①】**
- ◆ 世界初、パルス中性子ビームで**車載用燃料電池セル内部の水の可視化**に成功 **【成果例②】**
- ◆ ヒドリド超イオン導電体の発見
- ◆ **伝導率が世界最高のリチウムイオン伝導体**が示す全固体電池設計の新しい方向性 **【成果例⑤】**



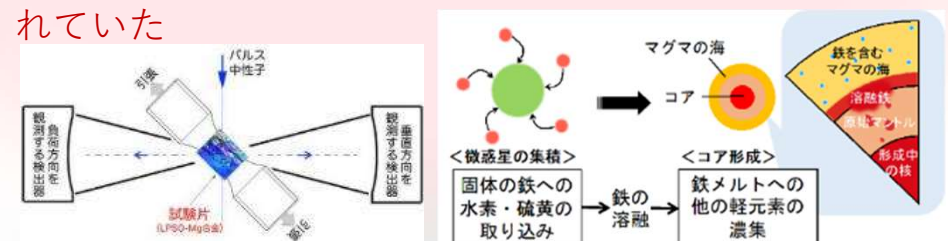
固体物理

- ◆ **超高密度な磁気渦**を示すシンプルな二元合金物質を発見 次世代磁気メモリへの応用に期待 **【成果例④】**
- ◆ 超伝導体においてスピン配列の制御を実現
- ◆ 鉄シリコン化合物における新しいトポロジカル表面状態 ありふれた元素を用いたスピントロニクス機能の実現
- ◆ **巨大な磁場応答を示す三角格子磁性半導体**
- ◆ 量子磁性体でのトポロジカル準粒子の観測に成功



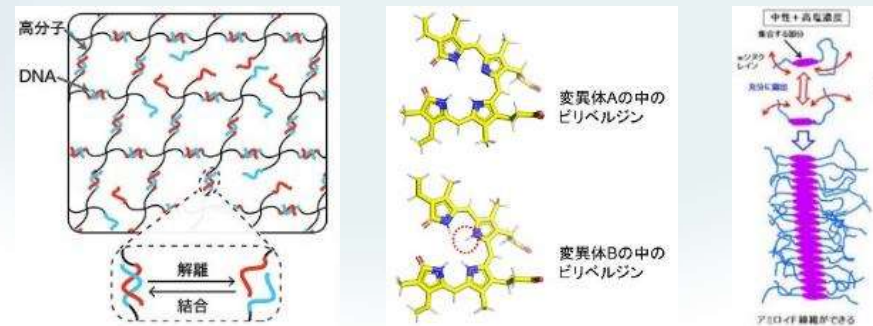
材料工学・地球科学

- ◆ 柔らかくて硬い!? 生体骨に近い特性の金属材料を開発
- ◆ 日本が開発した**高強度マグネシウム合金**はなぜ強いのか **【成果例③】**
- ◆ 極低温で現れる先進的合金の特異な変形メカニズムを解明 - 宇宙開発などに役立つ高性能な低温構造材料の開発に期待 -
- ◆ 地球形成初期、**鉄への水素の溶け込みは硫黄に阻害**されていた



ソフトマター・バイオマター

- ◆ **ハイドロゲルの流動性をDNAで予測・制御**する
- ◆ **水素原子1つで変わる!** 光合成タンパク質へのエネルギー伝達を担う色素を作る酵素の働き **【成果例⑥】**
- ◆ タンパク質の動きが病気を引き起こす- **パーキンソン病の原因タンパク質の分子運動を観測**することに成功

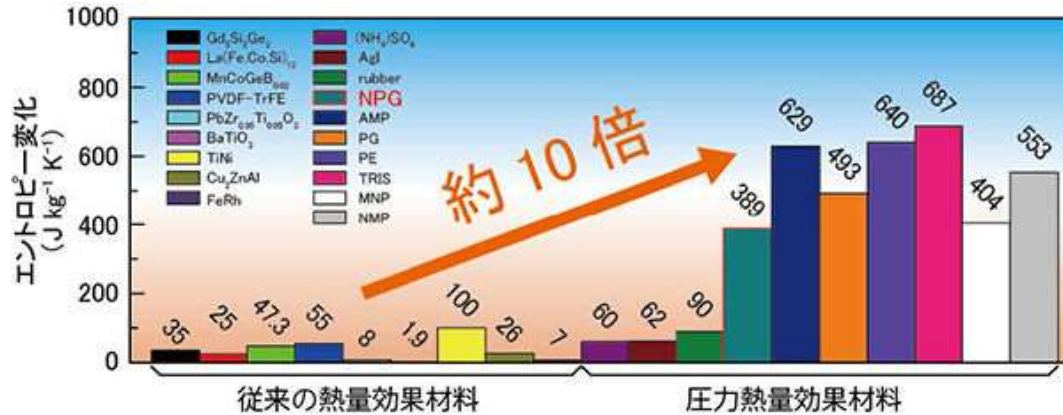


成果例①: 固体冷媒を用いた新しい冷却技術

2019.03.29 プレスリリース

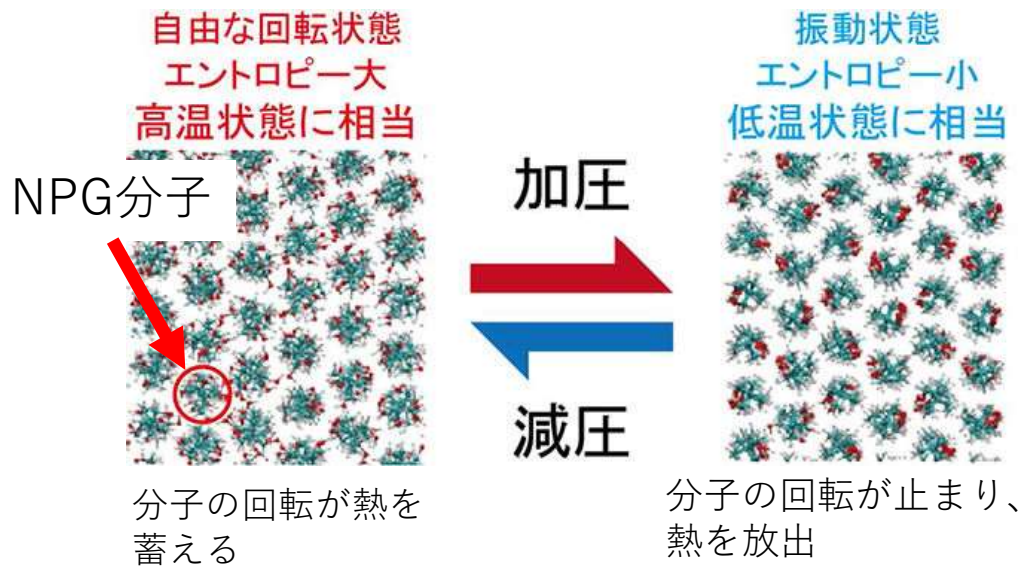
中国科学院、JAEA、J-PARCセンター、大阪大学、NIMS、JASRI 他
Nature 2019

TOP 0.28%
被引用件数 168
IF: 42.779 (2019)



- 環境負荷が少ない**固体冷媒**に期待
- 従来の固体冷媒の**10倍**にも及ぶ発熱・吸熱を生じる「**柔粘性結晶**」における巨大な「**圧力熱量効果**」のメカニズムを原子レベルで解明

- 大きな圧力熱量効果を示す柔粘性結晶NPG（ネオペンチルグリコール）に着目
- J-PARCの中性子線やSPring-8のX線などを利用し原子レベルで圧力熱量効果の起源を解析
- NPGの中性子準弾性散乱による観測から、NPG分子の回転に伴う巨大なエントロピー変化が、巨大な圧力熱量効果の起源であることを解明



「柔粘性結晶」の圧力変化に伴う分子運動の変化が巨大な「熱量効果」をもたらすことを解明

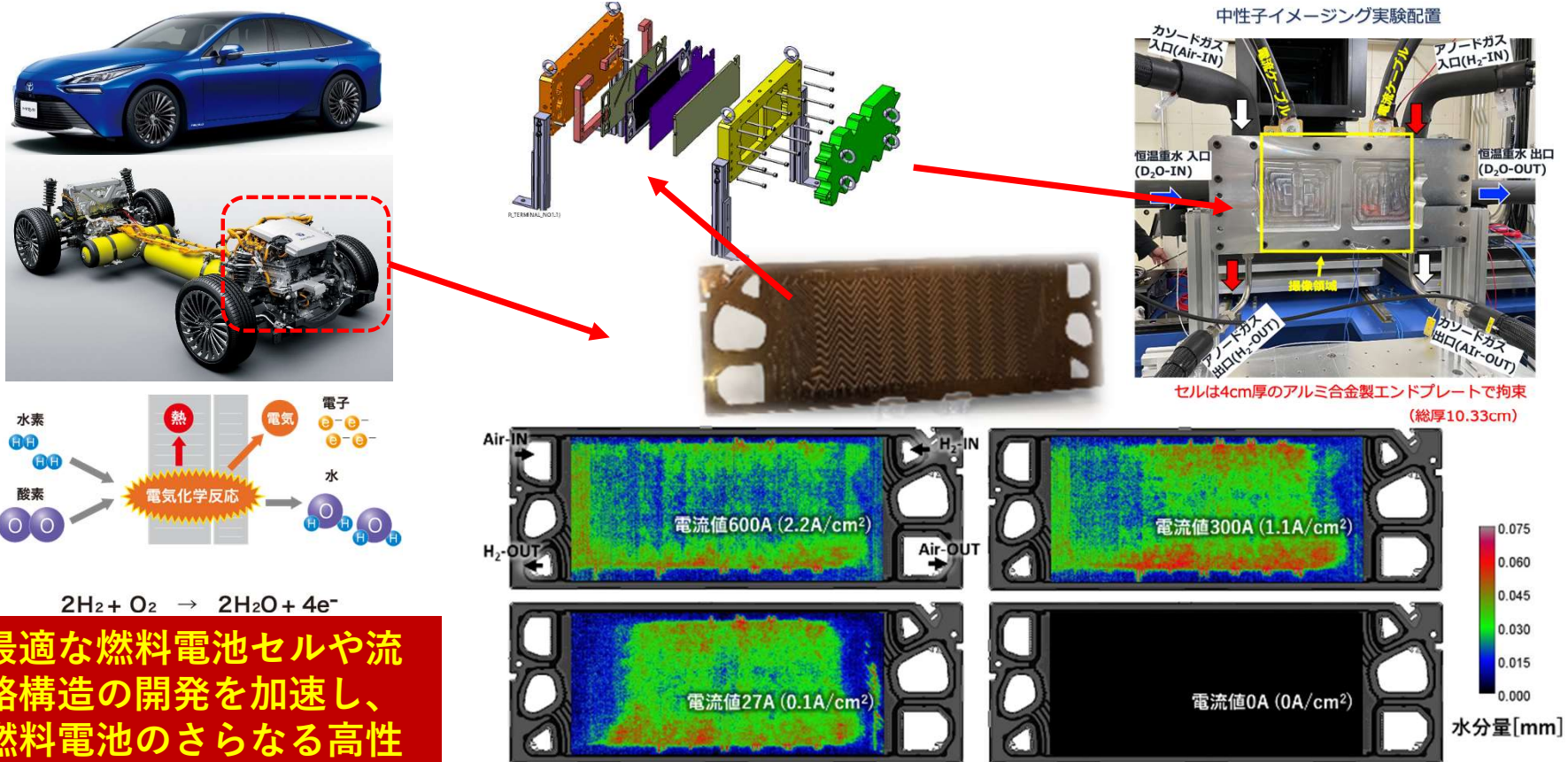
柔粘性結晶の巨大圧力熱量効果メカニズム解明（学術的成果）
⇒ 温室効果ガスを使わない環境にやさしい冷却技術の開発（グリーンイノベーション）に貢献

成果例②：燃料電池のオペランド測定

2022.7.12プレスリリース 世界初、パルス中性子ビームで車載用燃料電池セル内部の水の可視化に成功
 —燃料電池のさらなる高性能化で、温室効果ガス排出量削減に貢献—

NEDO、KEK、JAEA、J-PARCセンター、(株)日産アーク、技術研究組合FC-Cubic

- **燃料電池(Fuel cell: FC)**：水素と酸素からCO₂を発生させずに発電、水を排出。**未来のカーボンニュートラルなエネルギー**として期待
- 燃料電池を**実際稼働(発電)**させながら**中性子を照射**し、内部の**生成水の分布をリアルタイムで観察**
- 中性子ビームの高い透過力を活用した燃料電池観測技術の高度化を企業との共同研究により実施



最適な燃料電池セルや流路構造の開発を加速し、燃料電池のさらなる高性能化・低コスト化に期待

中性子イメージングによる作動中MIRAIセルの凝縮水可視化に成功

低エネルギー中性子の領域で10倍の強度が得られるBL13に産業利用新BLを提案中

成果例③: 高強度マグネシウム合金の開発

2023.8.15 プレスリリース 日本が開発した高強度マグネシウム合金はなぜ強いのか

- その場中性子回折実験で変形中の構成相それぞれのふるまいを解明 -

IF:9.209

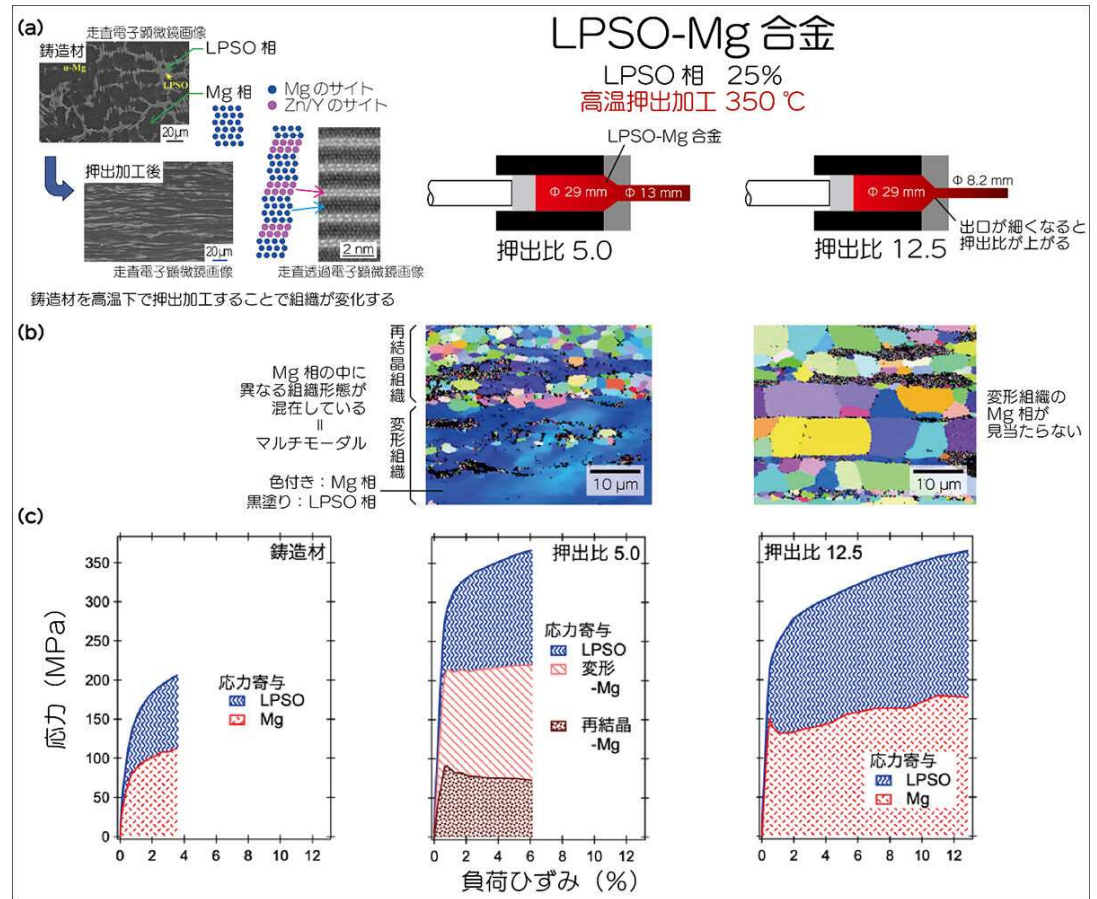
Acta Materialia (2023) 被引用件数: 4

JAEA、熊本大学、J-PARCセンター

- 熊本大学で開発されたマグネシウム合金 (LPSO-Mg合金) は、**軽量でありながら、その密度当たりの強度が強く**、各方面での応用が期待されている。
- LPSO-Mg合金は、高温押出加工によって強度が大きく向上するが、その**メカニズムは未解明**だった。

バルク試験体のその場中性子回折実験より、押出条件によって構成相それぞれの組織発達が異なり、合金全体の強度と延性に大きく影響していることを解明

- **延性や剛性など目的に応じた性質を持つ軽量高強度マグネシウム合金材料の開発指針を提示**
- **軽量高強度材料の実用化による航空機・自動車の省エネルギー・安全性に貢献**



- (a) 研究で用いたマグネシウム合金と高温押出加工
- (b) 高温押出加工後の組織写真 押出比が低い場合、変形組織と再結晶組織の Mg 相が形成される (マルチモーダル)
- (c) 引張変形中の LPSO-Mg 合金構成相それぞれの強度への寄与

成果例④: 超高密度な磁気渦を示す二元合金物質の発見

2022.3.30 プレスリリース

Nature Comm (2022) IF:17.694

東京大学、理化学研究所、東北大学、富山県立大学、大阪大学、総合科学研究機構、JAEA、J-PARCセンター等

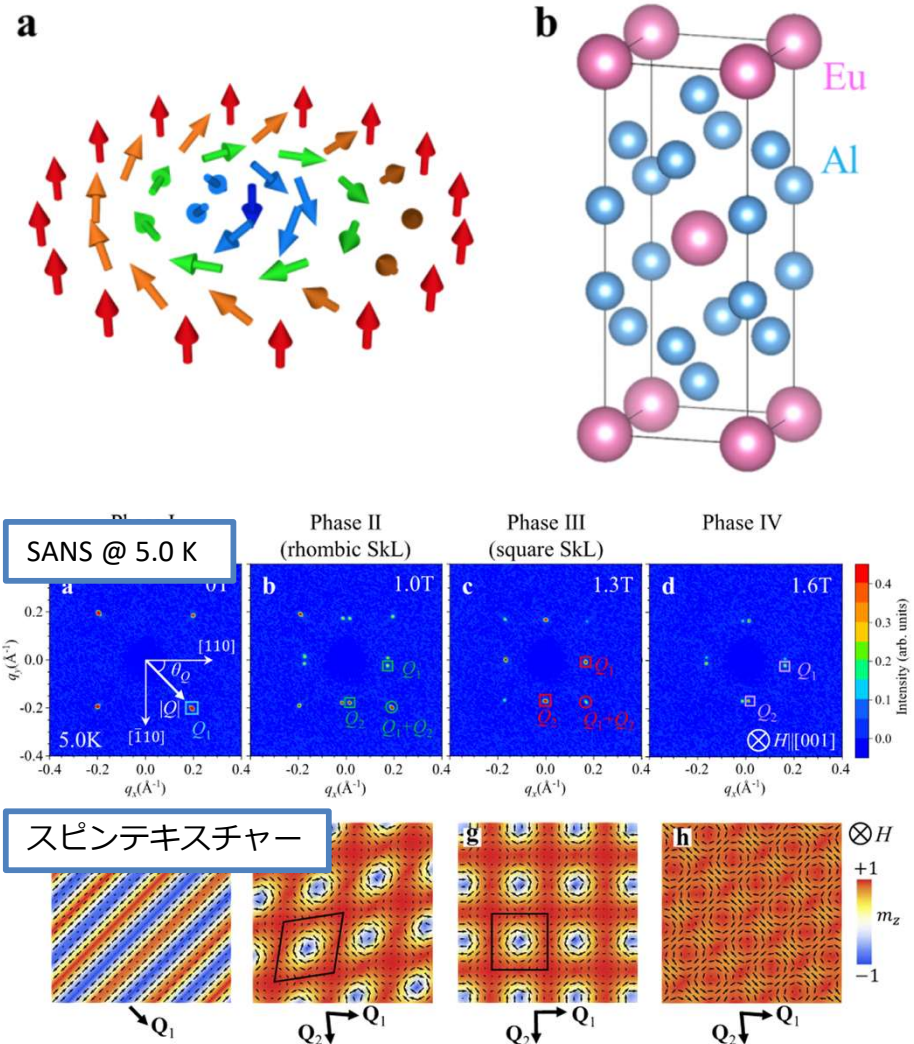
被引用件数：54

- 電子スピンの渦巻き構造である**磁気スキルミオン**は、典型的な直径が数十～数百ナノメートルと小さく、**新たな情報担体の候補**
- 特殊な対称性の結晶構造を持つ物質中でのみ現れると考えられていた磁気スキルミオンが、二種類の元素からなるシンプルな合金中 (EuAl_4) でも形成されることが報告

偏極中性子小角散乱およびX線回折実験により、磁場や温度によって磁気スキルミオンの並び方が正方格子から菱形格子へと変化することを観測

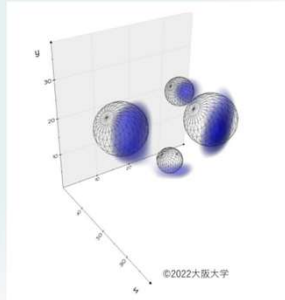
磁気スキルミオンの並び方の変化が、物質中を動き回る電子が媒介する相互作用に由来していることを解明

- 磁気スキルミオン形成の新機構を実証
- 省電力型の次世代磁気メモリとして期待されるスピントロニクス材料開発への道筋が開けることが期待



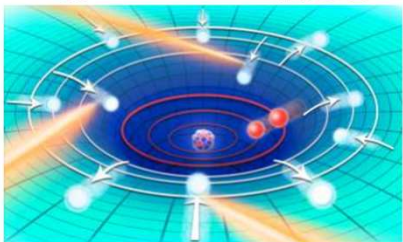
非破壊分析（文理融合研究・地球惑星科学）

- ◆ 素粒子ミュオンにより非破壊で小惑星リュウグウの石の元素分析に成功
 - ー 太陽系を代表する新たな標準試料となる可能性ー**(成果例①)**
- ◆ 素粒子ミュオンを用いた非破壊三次元元素分析に成功
 - ー 量子ビーム技術と宇宙観測検出器の出会いによる新技術開発ー
- ◆ 緒方洪庵が遺した“開かずの薬瓶”非破壊で解明
 - ミュオンビームによる医療文化財の分析に成功 **(成果例①)**



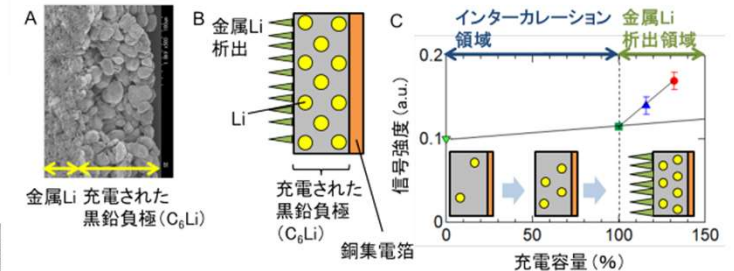
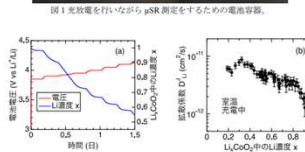
基礎物理・装置

- ◆ 量子電磁力学をエキゾチック原子で検証
 - ー ミュオン特性X線エネルギーの精密測定に成功
- ◆ ミュオンをつくるため、黒鉛円板は回り続ける
 - ー 日本とスイスの国際協力による挑戦ー
- ◆ 逆転の発想『ラビ振動分光』でミュオニウム原子を精密に測定 **(成果例③)**
- ◆ 最先端超伝導検出器で探るミュオン原子形成過程の全貌
 - ー 負ミュオン・電子・原子核の織り成すフェムト秒ダイナミクスー
- ◆ 「理想の水素原子」で未知の物理現象を探索する
 - ミュオニウムのマイクロ波分光実験がスタート
- ◆ 発光イメージングを用いてミュオンビームの分布計測に成功：ビームの精度管理や素粒子研究への応用に期待



エネルギー科学

- ◆ 充放電中のリチウムイオン電池内でリチウムイオンの運動を初測定 **(成果例④)**
- ◆ 正負のミュオンで捉えた全固体リチウム電池負極材料のリチウム移動現象
- ◆ 次世代太陽電池材料が高効率性を発揮するメカニズムを解明
 - ー ミュオンによる観測・評価法を活用、より高効率で低コストの材料開発へ期待ー **(成果例②)**
- ◆ ナトリウムイオン電池の負極材料開発に光
 - ー ハードカーボン中のナトリウムイオン拡散を観測ー
- ◆ 正負のミュオンで捉えたイオンの動き
 - ー Liイオンの動きを、負ミュオンで確認、正ミュオンで詳細観察ー
- ◆ リチウムイオン電池電極に析出した金属リチウムをミュオンで検知
 - ー ミュオン特性X線による非破壊元素分析の応用ー
- ◆ ミュオンを使ったその場観察の手法により 水素貯蔵物質からの水素脱離反応の仕組みを観測



半導体ソフトウェア

- ◆ 宇宙線のミュオンと中性子が引き起こす半導体ソフトウェアの違いを解明 環境放射線に対する効果的な評価・対策技術の構築に向けて

材料科学

- ◆ 層状化合物にミクロな磁気揺らぎが存在
 - ー ミュオンで3つの温度領域を発見ー

成果例①: 緒方洪庵が遺した“開かずの薬瓶”を非破壊で解明

2022.9.23 プレスリリース

太陽系の成り立ち、生命の起源に迫る

Science (2022) IF: 63.832

13,385 download

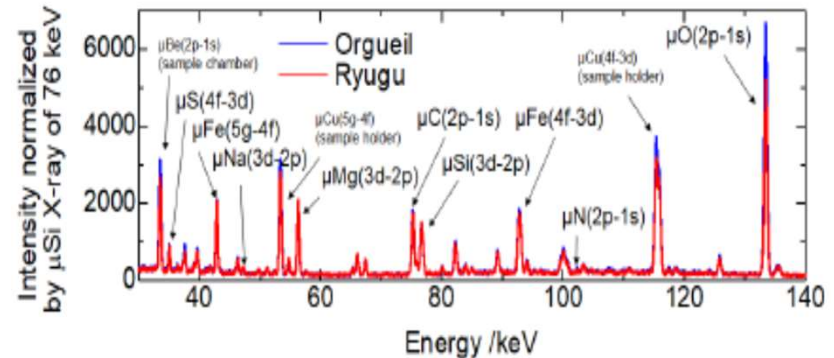
被引用件数: 29

小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウのサンプル J-PARCで初期分析

素粒子ミュオンにより非破壊で小惑星リュウグウの石の元素分析に成功



- 小惑星リュウグウの石の初期分析にJ-PARCのミュオン元素分析法を適用
- 約0.1 gの試料の非破壊分析を行い、リュウグウの石の平均的組成が明らかに
- これまで最も始原的と言われていた隕石の組成に近いものの、酸素の含有量が明確に少ないことが判明



画像提供: : JAXA、東大など

2021.3.17 プレスリリース

歴史的遺産へ理学的なメスを入れる

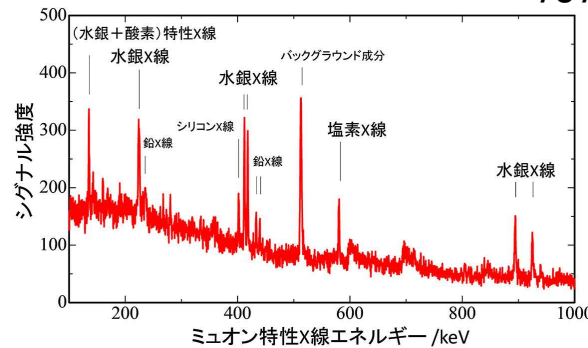
文理融合の研究 緒方洪庵が遺した“開かずの薬瓶”非破壊で解明

J. Natural Medicines (2021)

787 アクセス 被引用件数: 11

ミュオンによる医療文化財の分析に成功

- 緒方洪庵の薬箱に遺された開栓不可能なガラス瓶内の薬剤を分析し、内容薬物の特定に成功
- これまで非破壊で密封された容器の内容物を分析することは不可能だったが、ミュオンビームを利用することで可能に
- 破壊的分析が許されない文化財の分析への応用に期待



緒方洪庵晩年期使用薬箱 (提供: 大阪大学 高橋京子)

成果例②：次世代太陽電池材料が高効率性を発揮するメカニズムを解明

2022.1.21 プレスリリース

物構研: 幸田章宏、岡部博孝、平石雅俊、門野良典

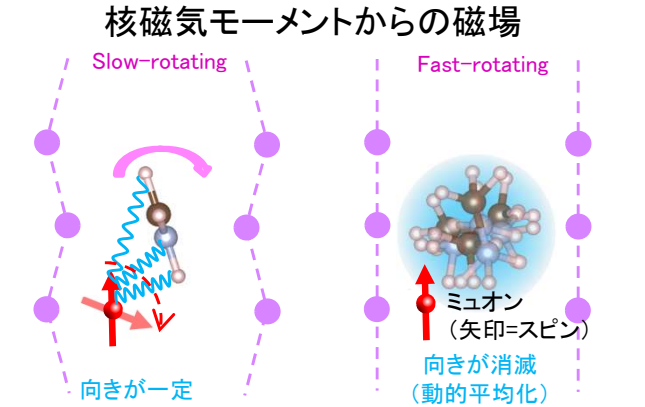
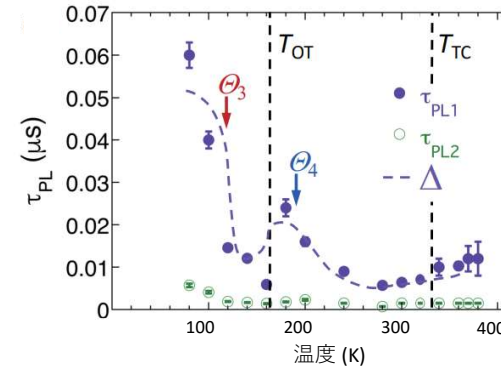
Univ. of Virginia: K. A. Dagnall, J. J. Choi, S. H. Lee

PNAS 119, e2115812119 (DOI:10.1073/pnas.2115812119)

IF: 12.779

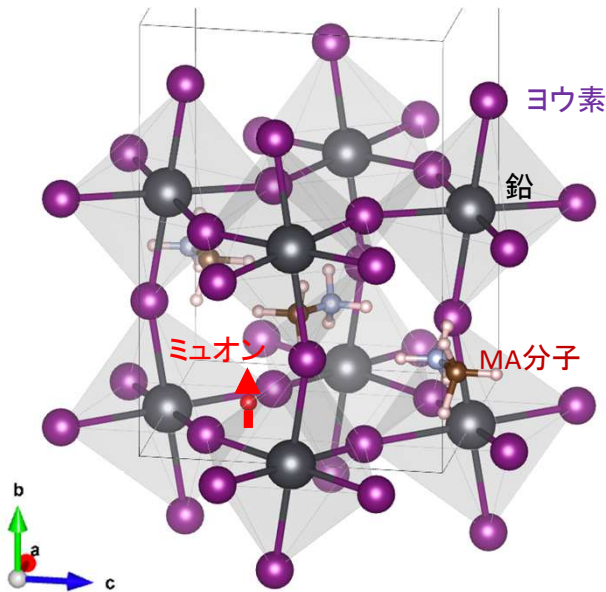
2049 アクセス 被引用件数: 2

次世代太陽電池材料として有望視されている有機無機ハイブリッドペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) の特徴である長い電荷キャリア寿命の起源を解明



光ルミネセンス測定から求めた電荷キャリア寿命 (丸印) およびミュオンスピン緩和率 (破線カーブ) の温度変化。縦の破線は構造相転移温度を表す。

ミュオンスピン偏極は分子からの磁場で変化 (減衰) する
 ミュオンスピン偏極は変化しない (磁場の変化に追従できない)



$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の結晶構造

- μSR 法により有機分子の回転運動が長い電荷キャリア寿命と相関することを発見
- 固体内分子の運動の観測に μSR 法が活用できることを初めて実証

高効率で安価な次世代太陽電池や光情報処理デバイスの開発のためのツールとしての μSR 法の活用の道を拓いた



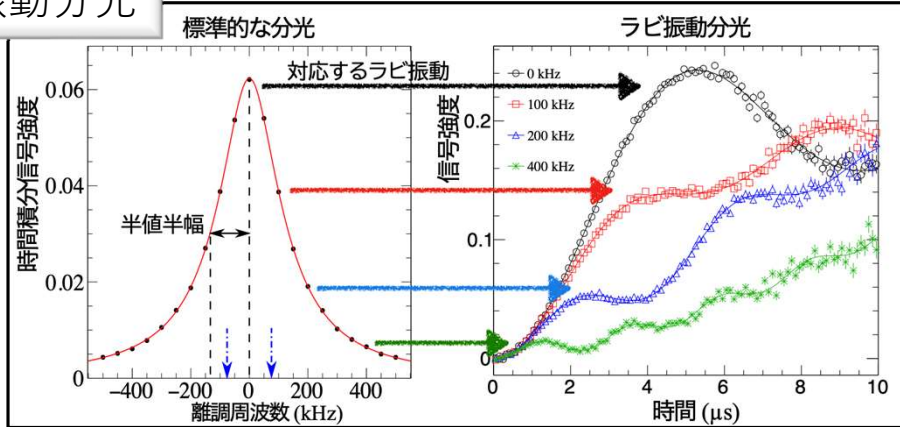
幸田章宏 岡部博孝 平石雅俊 門野良典 K.A. Dagnall J.J. Choi S.H. Lee

2021.8.10 プレスリリース 「逆転の発想『ラビ振動分光』で
ミュオニウム原子を精密に測定」

Phys. Rev. A (2021) IF: 2.971
被引用件数: 17

高エネルギー加速器科学研究奨励会西川賞受賞

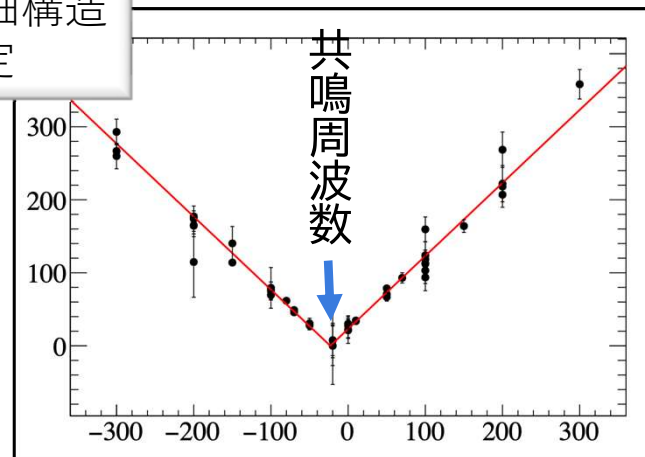
ラビ振動分光



マイクロ波吸収等で共鳴遷移する準位間の分光では従来の共鳴ピークを観測する手法は情報の一部しか利用していなかった。時間発展の情報をフルに活用する手法を開発し、MuHFSに応用。

ミュオニウム超微細構造 (MuHFS) 精密測定

MuSEUM実験グループはラビ振動分光法を初めて適用し、(ゼロ磁場下の) 従来精度を2倍更新する結果をDラインで得た



Hラインで本手法を用いて、高磁場下でのMuHFSを測定

ゼロ磁場下で世界最高精度を更新

素粒子標準モデルからのずれが示唆されるミュオン $g-2$ 実験の成功に不可欠なミュオン質量の高精度決定に道筋をつけた

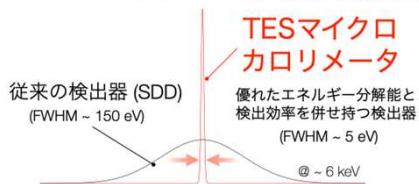
MLFでの成果: 5年間で特筆すべき手法開発

新たな技術開発: 最先端分光技術・ミュオン加速

「多素子超伝導転移端センサー型(TES)マイクロカロリメータ」量子ビーム実験への応用

他の量子ビーム・産業利用にも幅広く使える高度な検出器の開発

「優れたエネルギー分解能」と「検出効率」を両立するX線検出器
→ J-PARC大強度加速器 × 超高精度分光により多くの成果



J-PARC ハドロン (2018)
強い相互作用の研究
PRL 128, 112503 (2022)

J-PARC MLF ミュオン (2019-2023)
ミュオン原子形成過程の解明
PRL 127, 053001 (2021)
強電場下のQED検証実験
PRL 130, 173001 (2023)
↓
ミュオン触媒核融合研究(2023)
元素分析・化学分析(2024~)
など、幅広く展開中

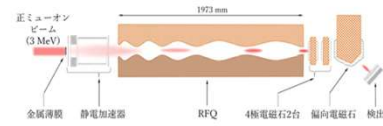
放射光・産業利用
さらなる応用へ

高エネルギー対応
大立体角化を推進

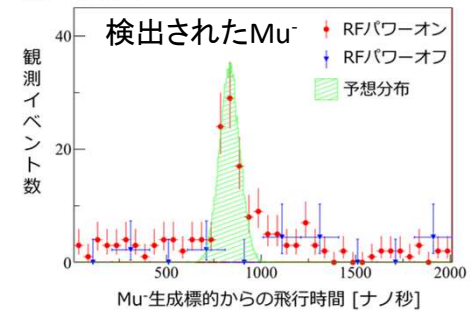


世界初のミュオンのRF加速実験に成功

ミュオンg-2、透過型ミュオン顕微鏡の実現に向けた技術開発



Mu-生成 / 正電荷則
RFQ加速
分光 / 検出

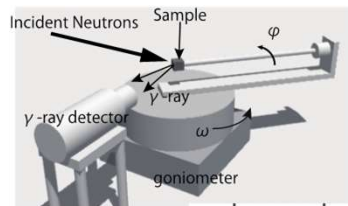
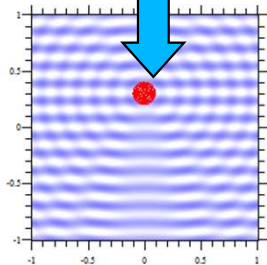


新たな測定技術: 中性子ホログラフィー

L. Cser et al. (2002)の原理を大山教授 (茨城大学) が実現

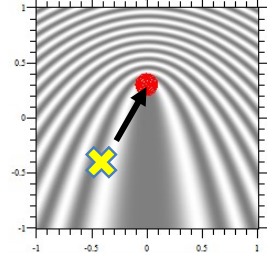
- ドーパント周りの原子構造をモデルなしで可視化できる **原子イメージング法** (顕微鏡的な方法)
- 構造物性目的の中性子実験では唯一 **元素選択性**を持つ。
- 世界でJ-PARCのみ実現

入射波 + 散乱波



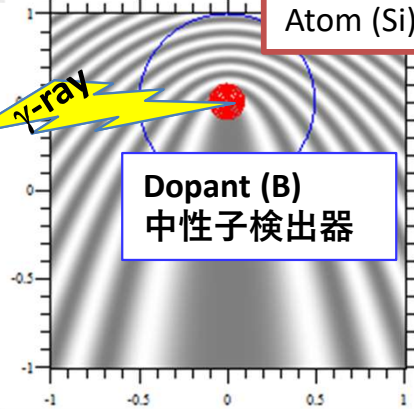
微量元素周りの原子構造を
元素選択的にマイクロに解析
する世界初の手法を開発

干渉波 (定在波)

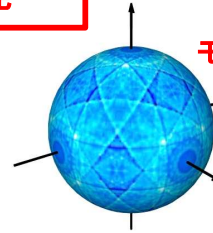


位相変化も記録されている。

ガンマ線
検出器

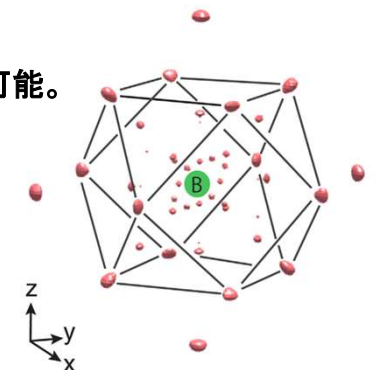


モデルなしで原子像再生が可能。



ドーパントが中性子を強く吸収

中性子強度に比例した**即発γ線**を放出
元素選択性 B: 477 keV



0.26% B dope Si
(Ohoyama et al 2018)



瀬戸秀紀教授
(写真：物質構造科学研究所)

2021年11月 日本中性子学会第21回年会で、瀬戸秀紀氏が学会賞を受賞



右側が佐野亜沙美氏

2023年5月 中性子利用セクション 佐野亜沙美氏が地球惑星科学振興西田賞を受賞



令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞 大谷将士 ミュオン線型加速器開発と世界初のミュオン加速実証研究



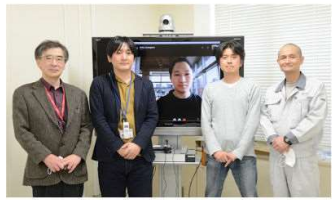
受賞した大原氏
(BL18, SENJUにて)

2021年11月 大原高志氏が日本結晶学会賞 学術賞を受賞



涌井隆氏(写真左)

2023年8月 中性子源セクション涌井隆氏らが日本実験力学会2023年度学会賞(論文賞)を受賞

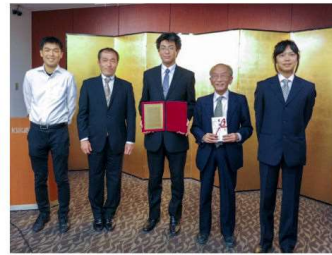


左より、神山氏、萩原氏 Cho 氏、鳥居氏、及川氏

2021年11月 日本中性子科学会第20回年会で2グループが「技術賞」受賞。「大強度パルス中性子発生のための陽子ビーム制御技術開発」(明午伸一郎氏、大井元貴氏、藤森寛氏、坂元真一氏)、「世界最高分解能TOF型粉末中性子回折装置SuperHRPDの開発」(鳥居周輝氏、及川健一氏、萩原雅人氏、Cho Kwanghee氏、神山崇氏)。



左より、藤森氏、明午氏、大井氏、坂元氏



受賞した皆様

2022年6月 高エネルギー加速器科学研究奨励会奨励賞西川賞を下村浩一郎氏、西村昇一郎氏及び神田聡太郎氏が受賞「ミュオニウム超微細構造精密測定におけるラビ振動分光の研究」



ゴンウー氏

2022年10月 ゴンウー氏が日本中性子科学会「奨励賞」を受賞 同マオウエンチ氏が「ポスター賞」を受賞

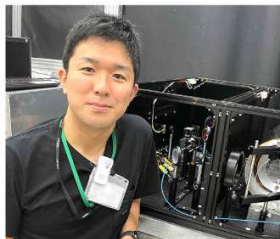


2023年3月 梅垣いづみ氏が物理学会若手奨励賞を受賞。2022年10月 日本中性子科学会の「波紋 President Choice」を受賞



左より、丸山氏、奥平氏

2021年11月 日本中性子科学会第20回年会で丸山龍治氏、奥平琢也氏が学会誌「波紋」への投稿記事に関して「プレジデントチョイス賞」で表彰。



2021年11月 日本中性子科学会第21回年会で、奥平琢也氏(名大助教・共通技術開発セクション協力研究員)が奨励賞を受賞。



ハルヨ ステファヌス氏

2022年8月ハルヨ ステファヌス氏がエルゼビア発行のActa Materialia と Scripta Materialia の優秀レビュー賞を受賞



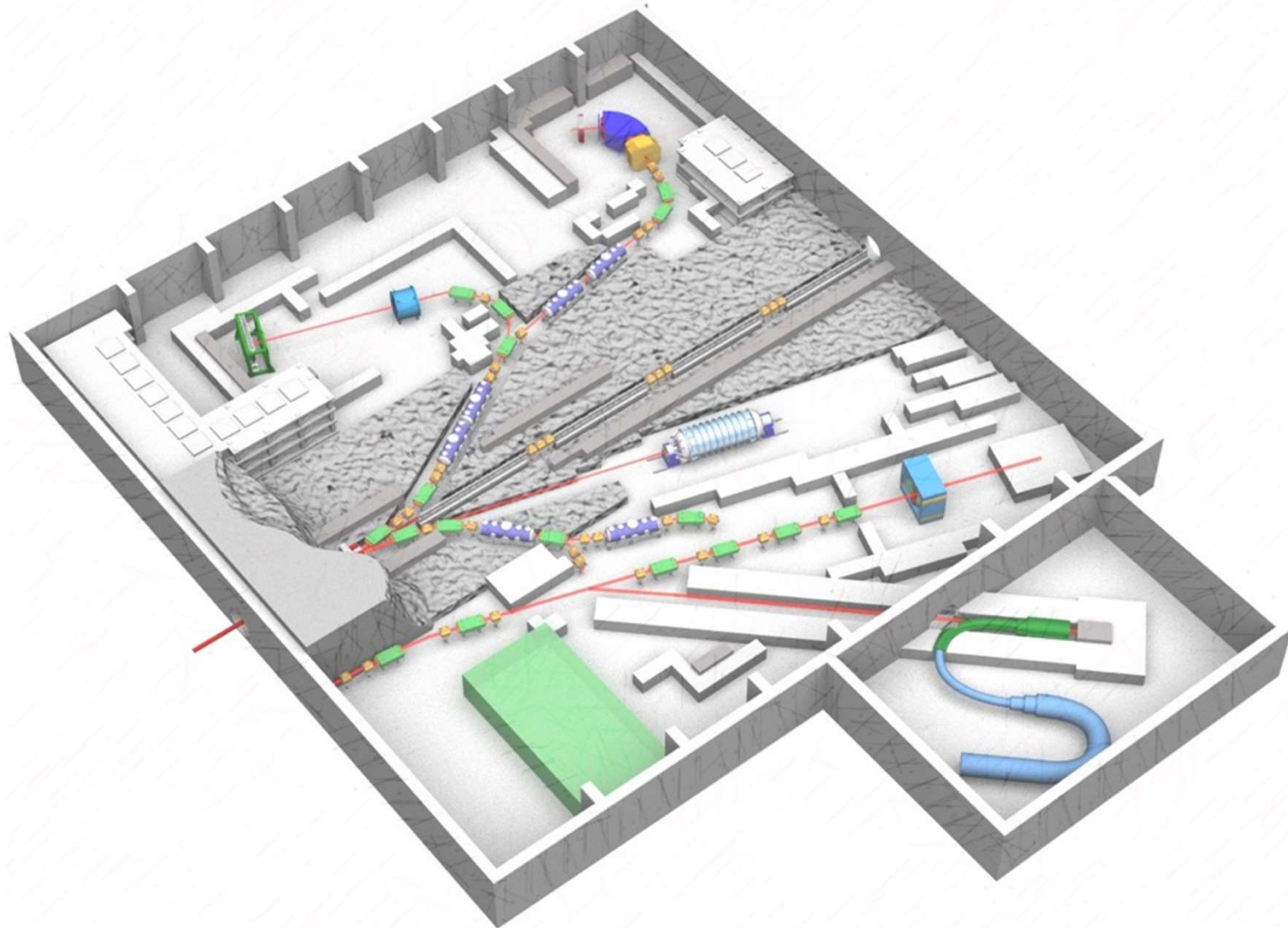
左側が三宅康博氏
(日本中間子科学会のウェブサイトより引用)

2023年3月 ミュオンセクション三宅康博名誉教授が日本中間子科学会功績賞を受賞

2019年11月 新井正敏 元物質・生命科学ディビジョン長が第17回日本中性子科学会「功績賞」受賞。「パルス中性子の活用に関する先駆的研究と先導的役割」

2021年11月 日本中性子学会第21回年会で、理化学研究所の細島拓也氏、山形豊氏がMLFの中性子BLで利用するガイドミラーの開発に関して技術賞を受賞

2. ハドロン実験施設における主な成果

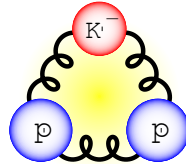


ハドロン実験施設：主な成果等

K中間子やミュオンを用いた原子核・素粒子実験を展開

(東北大学、東京大学、岐阜大学、
京都大学、大阪大学、九州大学、他)

- K 中間子で
ハドロン物理、ストレンジ核物理
の新しい局面を拓く
(高密度核物質、一般化された
核力の理解の推進)
- K 中間子の**稀な崩壊**を通じ、
小林・益川理論を超える
CP 非保存現象を探索する
- **高運動量ビームライン**で
ハドロン**の質量獲得機構**の
解明を目指す
- **μ -e 転換実験**(COMET)
標準模型を超える物理法則の
発見を目指す

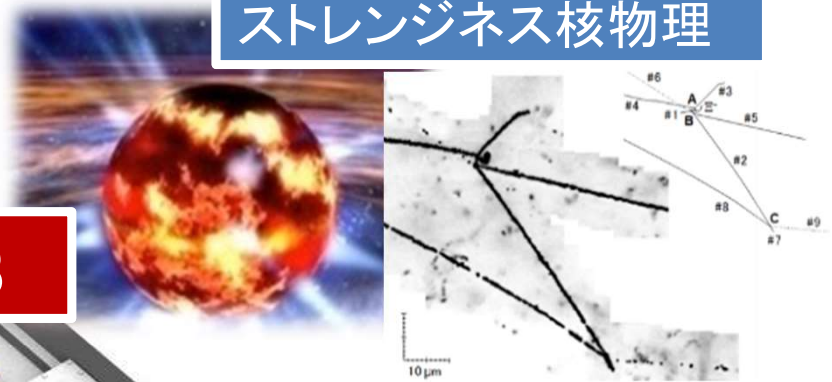


ハドロン物理

K1.8

K1.8BR

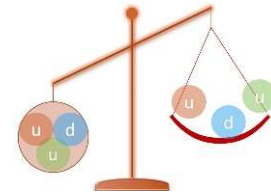
ストレンジネス核物理



KL

K稀崩壊 (CPの破れ)

ハドロン質量



高運動量ビームライン

【2020.8.11】
高運動量ビームラインの
運転開始を発表

【2021.3.2 プレス発表】

稀少な超原子核「グザイ核」の質量を
初めて決定

- 原子核の成り立ちや中性子星
の構造を理解する新たな知見

実験責任者の仲澤和馬シニア
教授(岐阜大学教育学部)が
「2020年度(第66回)仁科記念
賞」を受賞



ミュオン(μ)-電子(e)転換実験

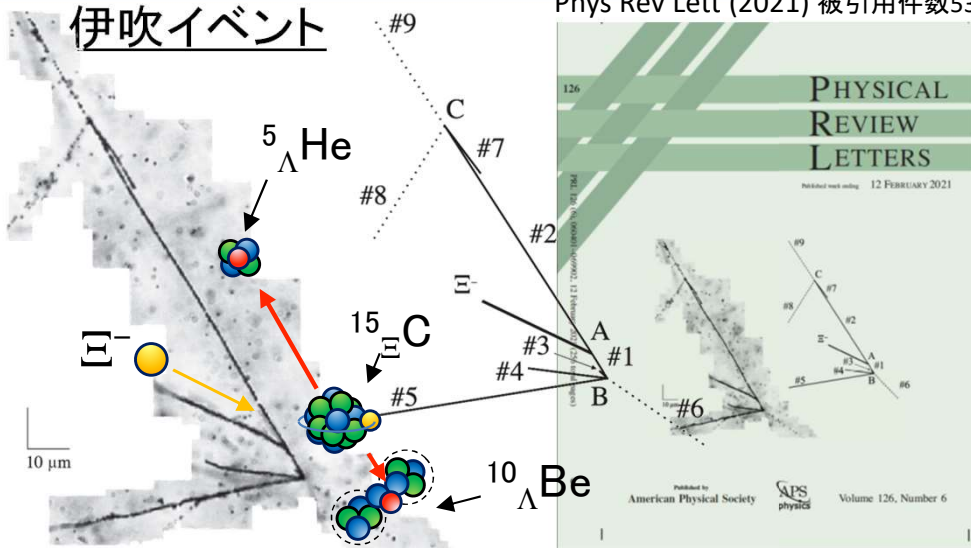
COMET ビームライン

ハドロン実験施設: 主な成果等

ストレンジ核子まで含めた「一般化された核力」の性質と起源の解明

グザイハイパー核の質量測定に初めて成功

Phys Rev Lett (2021) 被引用件数53



グザイ粒子と核子との間に働く力が
引力であることを確定

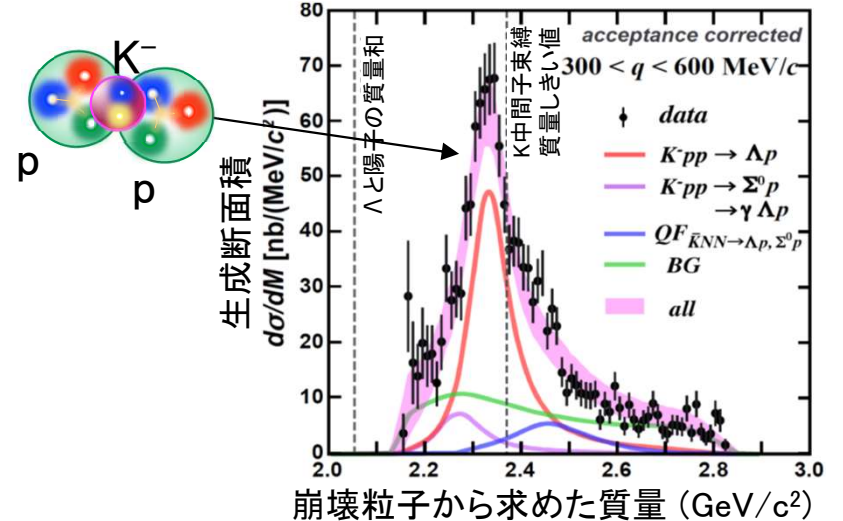
K-中間子を含む新しい原子核の発見

Phys Lett B (2018) 被引用件数68; Phys Rev C (2020) 被引用件数25

原子核より約10倍大きな束縛エネルギー

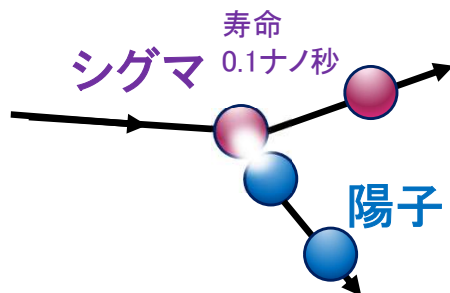


極めてコンパクト(高密度)で特異な
原子核であることを示唆

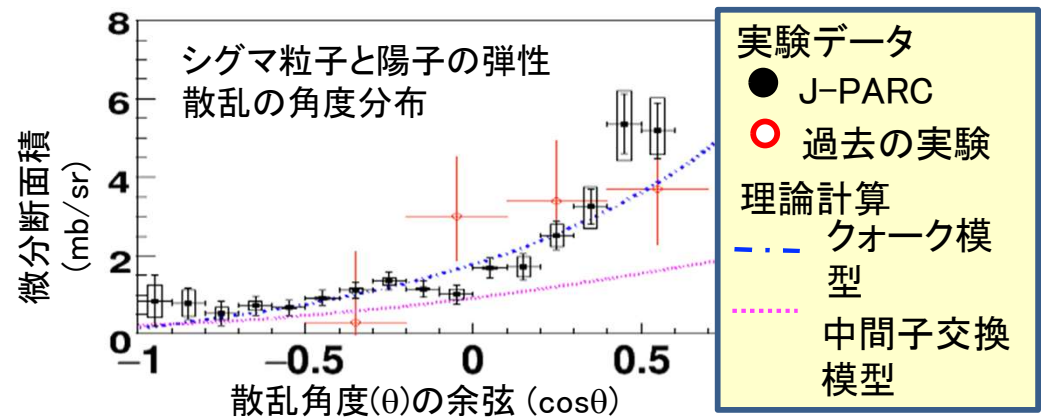


ストレンジ核子と陽子の散乱実験手法を確立

Phys Rev C (2021) 被引用件数22



半世紀ぶりに
散乱角分布の
測定精度を
10倍向上

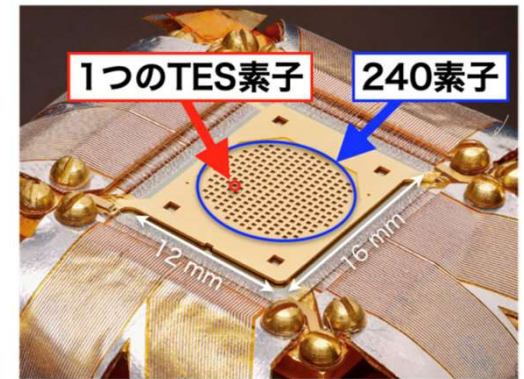
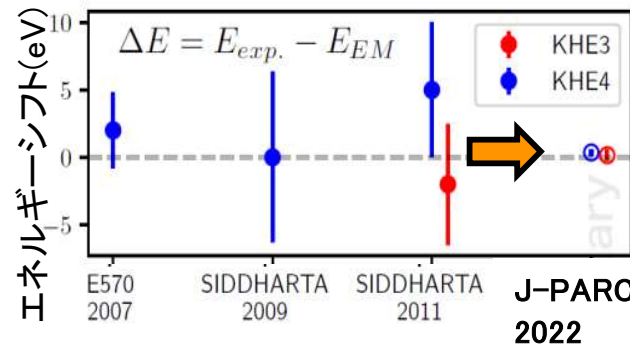
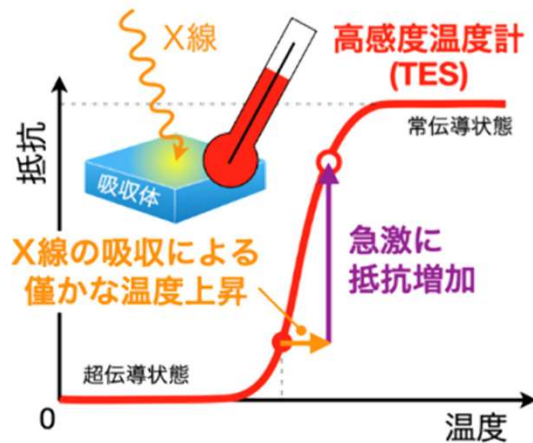


実験データ
● J-PARC
○ 過去の実験
理論計算
--- クォーク模
型
..... 中間子交換
模型

K中間子原子からのX線測定の高精度化に成功

Phys Rev Lett (2022)

世界最高精度の温度計と称される超伝導転移端型マイクロカロリメータ(TES)検出器をK中間子原子のX線測定に導入、**精度を10倍向上**



MLFでのミュオン原子からのX線測定にも導入；
産業応用につながる、分野横断的な検出器開発

小林益川理論を超えるCP対称性の破れの探索

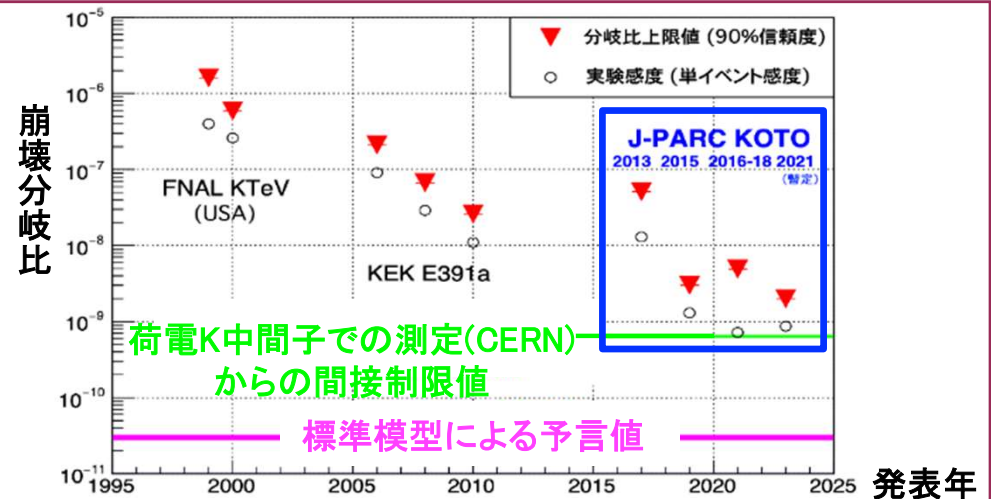
Phys Rev Lett (2019) 被引用件数188; Phys Rev Lett (2020) 被引用件数68

中性K中間子の稀な崩壊 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探す

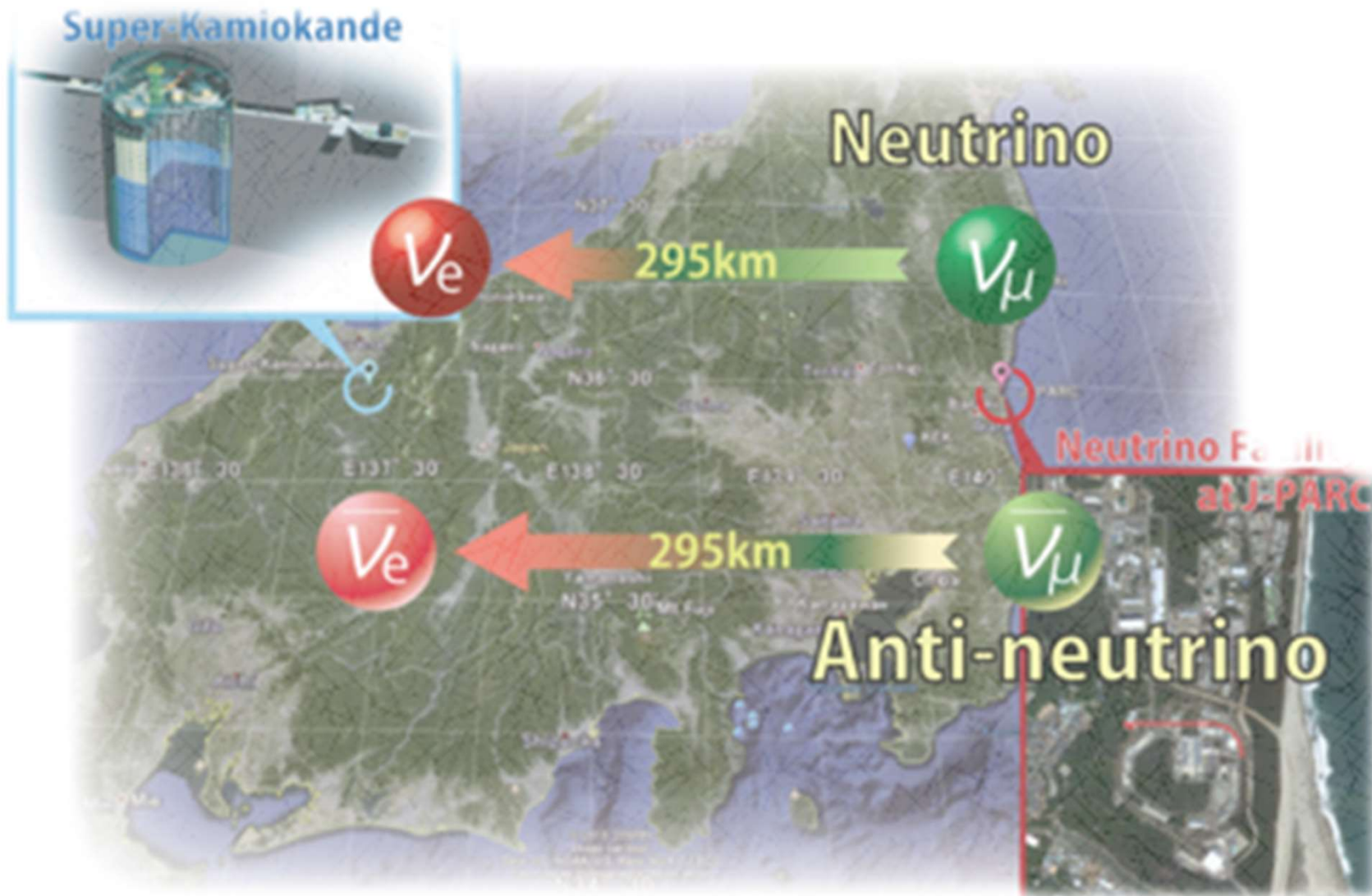
- ✓ CP対称性を破る過程
- ✓ 未発見の過程

世界最高感度で探索を継続中

- J-PARC以前の探索から10倍以上進展
- 新物理が現れる領域に迫っている

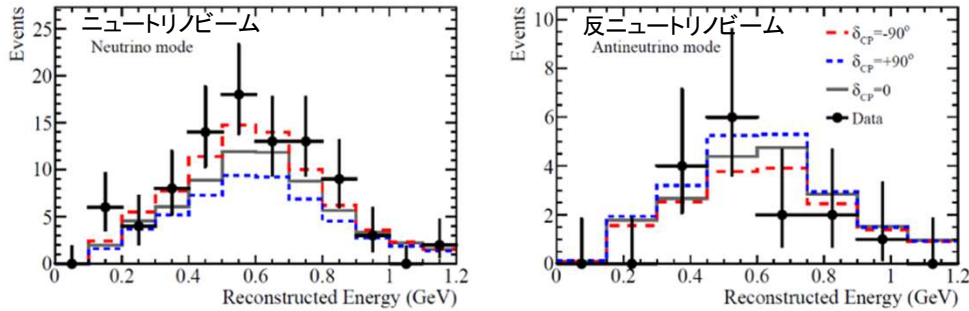


3. ニュートリノ実験施設における主な成果



ニュートリノ実験施設：主な成果等

J-PARCで生成したニュートリノを、約 295 km 離れたスーパーカミオカンデ検出器で検出し、ニュートリノ振動を正確に測定するT2K(Tokai to Kamioka)実験を実施



2020年までに観測されたミュー型ニュートリノからニュートリノ振動によって現れた電子型ニュートリノのエネルギー分布。CP対称性の破れがない場合の予想値に対して、ニュートリノビームでは観測数が多く(左)、反ニュートリノビームでは観測数が少ない(右)という傾向がみられた。

- ・ 14カ国、78機関、約600人の国際コラボレーション
ミュー型ニュートリノをJ-PARCで生成
スーパーカミオカンデで検出

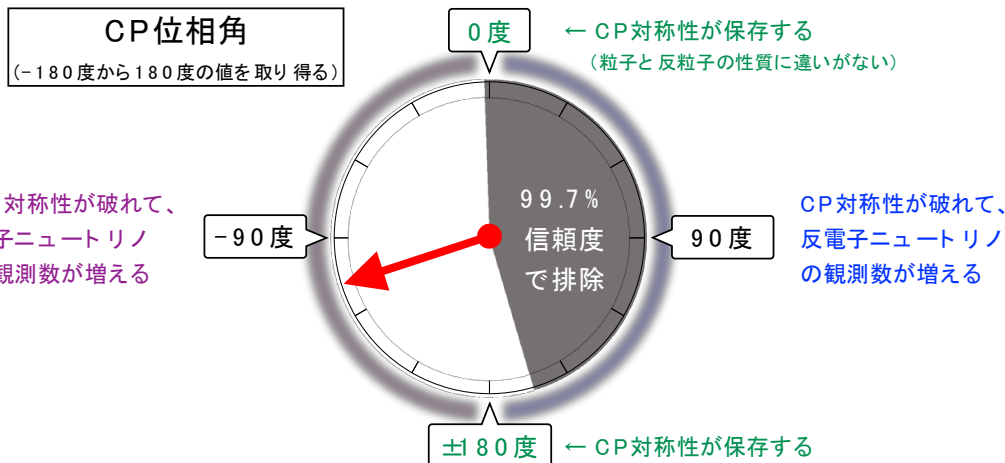
**2011年-2013年: 世界で初めて、
ミュー型ニュートリノから電子型ニュートリノへの
変化を発見**

➤ 一連の論文引用数:2747
(INSPIRES 23.10.16)

- 2016年: 仁科記念賞、ブレークスルー賞
- 2017年: ポンテコルボ賞受賞
- 2020年: 猿橋賞

- ・ **世界で初めて、ニュートリノのCP対称性の破れを表す位相角を測定。広い領域を99.7%の信頼度で棄却**

- Nature誌により
2020年の10大発見に選出
- 2023年: 仁科記念賞



ニュートリノ実験施設：主な成果等

- T2K実験では2011年に世界で初めてミュー型ニュートリノから電子ニュートリノへの振動現象の兆候をつかみ、2013年にはそれを確立。
この成果は2015年、梶田隆章東大宇宙線研所長がノーベル物理学賞を受賞した研究と密接に関連
- 2016年8月、世界で初めてニュートリノの「CP対称性の破れ」が90%の確率で存在することを発表。**2020年には99.7%の確度で「CP位相角」を大幅に制限し、国際的な科学雑誌Natureに掲載。同年の特に注目すべき10大発見に選ばれる。**物理学最大の謎の1つである、宇宙の物質優勢の謎に迫る。
- 以上の優れた成果により、T2K実験は内外から高く評価。
2014年：小林隆氏(元実験代表者)と中家剛氏(元実験代表者)が仁科記念賞を受賞
2016年：西川公一郎氏(元実験代表者)が米国ブレークスルー賞財団 2016年ブレークスルー基礎物理学賞及び2017年ポンテコルボ賞を受賞
2020年：市川温子氏(前実験代表者)が猿橋賞を受賞
2023年：市川温子氏(前実験代表者)が仁科記念賞を受賞
- ニュートリノ測定器用に、半導体ベースの光子測定器MPPCを浜松フォトニクス社と共同開発、世界で初めて大量採用し、産業応用も含め実用化に大きく貢献。



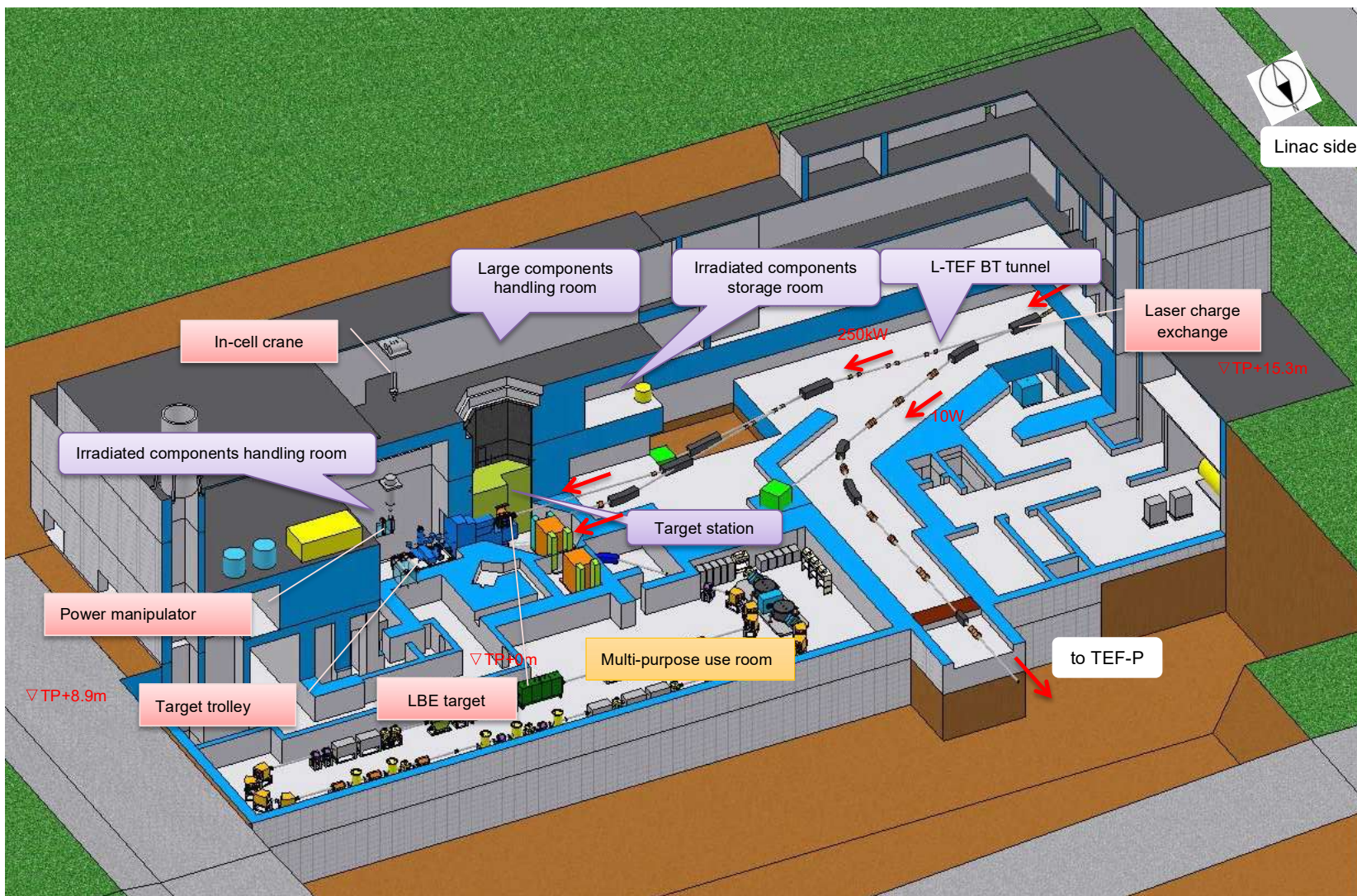
市川温子 東北大学教授



高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所 前所長
J-PARC 前副センター長
西川 公一郎 T2K実験 元代表

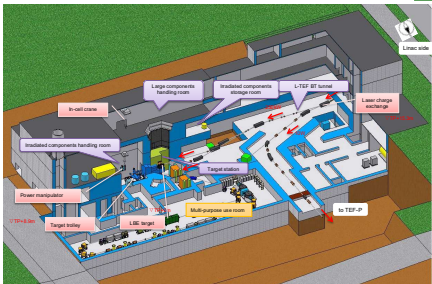
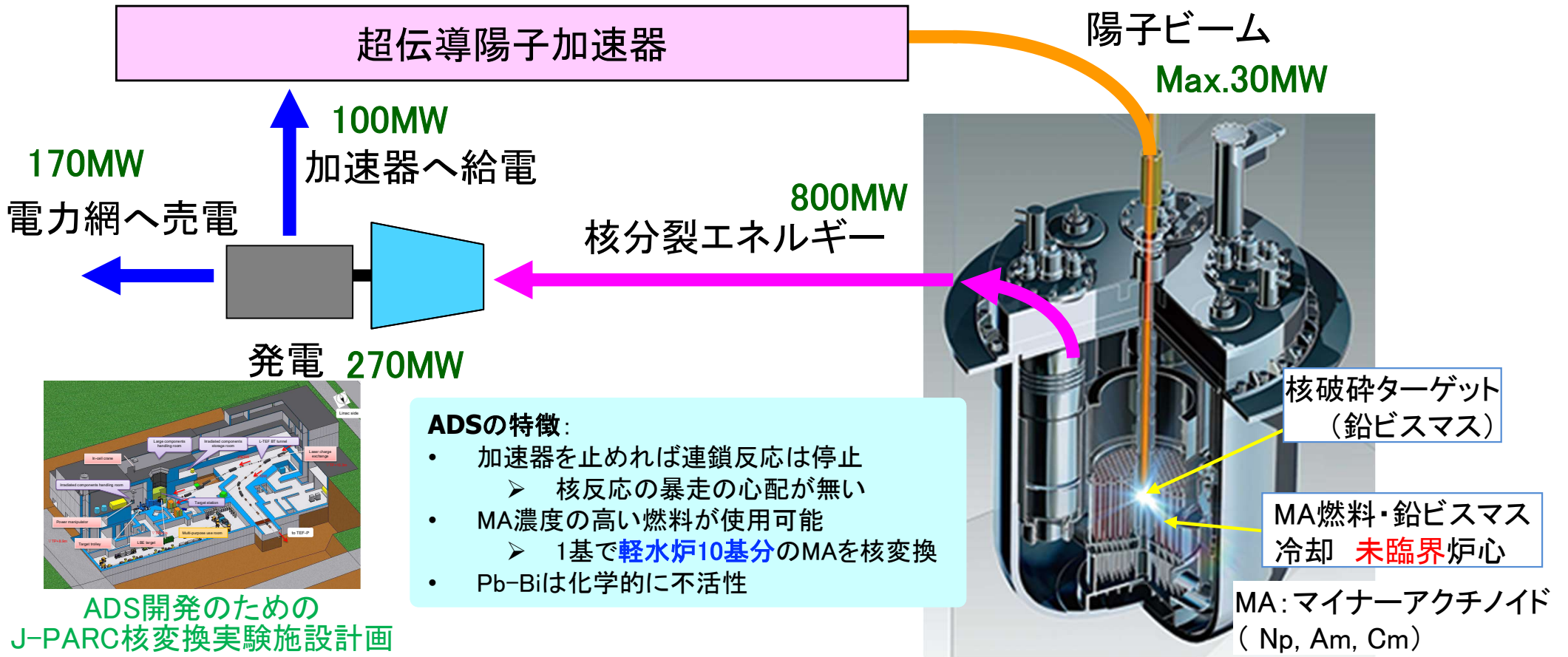
ブレークスルー賞 ホームページより

4. 核変換実験施設に向けた主な成果



核変換: ADSと開発課題

Accelerator Driven System (ADS) 大強度加速器で放射性廃棄物を低減



ADS開発のための J-PARC核変換実験施設計画

ADSの特徴:

- 加速器を止めれば連鎖反応は停止
 - 核反応の暴走の心配が無い
- MA濃度の高い燃料が使用可能
 - 1基で軽水炉10基分のMAを核変換
- Pb-Biは化学的に不活性

開発課題

J-PARCセンター

原子力基礎工学研究センター

大強度標的

- 鉛ビスマス取扱技術 **成果①**
- ビーム窓材料
 - ✓ 腐食・放射線損傷 **成果②**
- 核破碎ターゲット
 - ✓ 高エネルギー核データ **成果③**

加速器 成果④

- ビーム制御・高信頼性
- 超伝導
 - ✓ 加速空洞製作技術 **成果⑤**
- 大出力
- ビームロス低減

未臨界炉心

- 未臨界度監視
- MA炉心設計
 - ✓ MA核データ
- 原子炉物理

燃料サイクル

- 群分離
- 窒化物燃料製造
- 乾式再処理

■ 高温液体鉛ビスマス(LBE)標的システムの安定運転技術を確立 成果①

- 核変換実験施設で計画している LBE 標的システムのモックアップループにより、施設の運転を模擬した 500℃での運転、陽子ビームによる入熱を模擬した非等温運転及び500時間の長期連続運転に成功。

実験施設に求められる標的システムの運転能力を実証

● ポイント

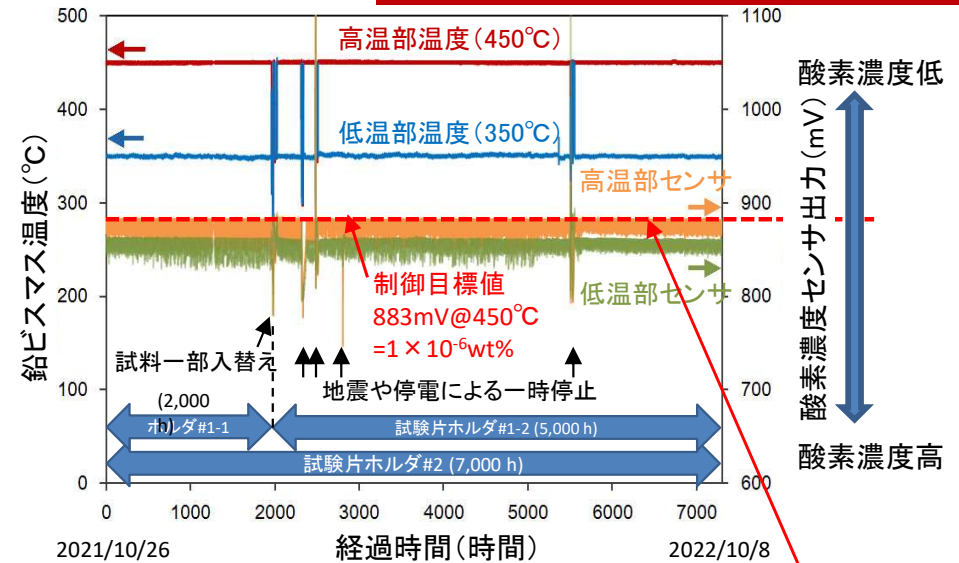
- ✓ 高温液体金属に適用可能な機器（電磁ポンプ、フリーズシールバルブ等）、およびセンサ類（超音波式流量計、酸素濃度センサ等）の開発
- ✓ 放射化した標的を交換するための遠隔操作による配管切断・溶接・溶接検査技術、遠隔操作で着脱可能なパッケージヒータの開発



■ 高温腐食試験ループを用いた、鉛ビスマスによる鋼材の腐食試験を開始 成果②

- LBEによる鋼材腐食の抑制のカギとなるLBE中酸素濃度制御技術を確立。
- LBEループを用いた鋼材の長期腐食試験を開始、第3キャンペーン試験(450/350℃、7,000時間)完了。

ADSの成立性に係る試験を開始

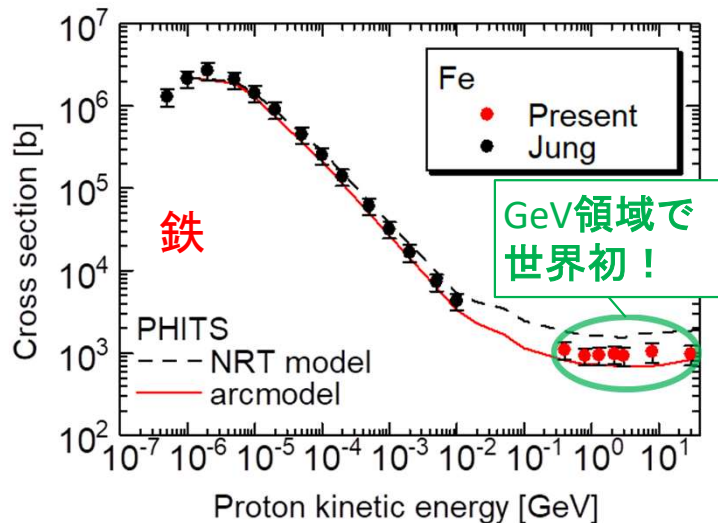


7,000時間にわたりLBE中酸素濃度を目標値に制御！



■ 材料の放射線損傷の指標となる核反応データを取得 **成果③**

- J-ARCの陽子ビームを用い、ADSで重要なGeVエネルギー領域において、**世界で初めて鉄等の弾き出し断面積実験データを取得**
- 原子当たりの弾き出し(dpa)の計算には、非熱的再結合(arc)の考慮が必要なことを示した。
- MEXT原子カシステム研究開発事業「J-ARCを用いた核変換システム(ADS)の構造材の弾き出し損傷断面積の測定」(H27~R1)

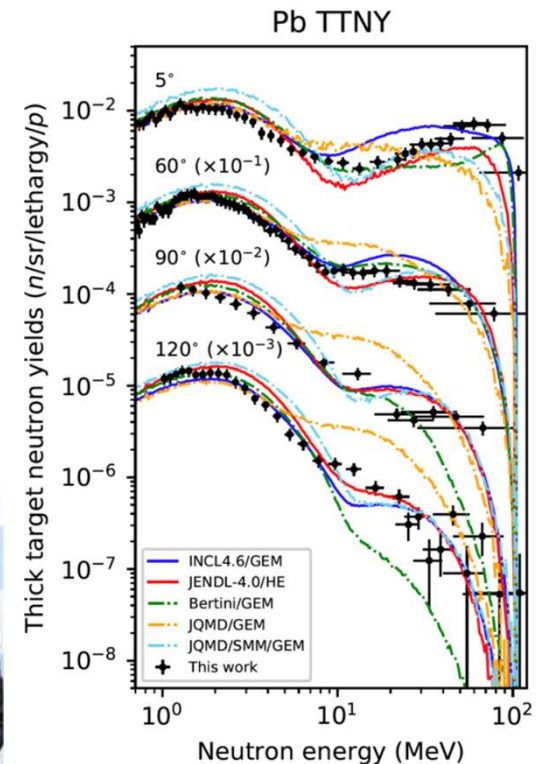


■ 実験データの希少な中性子生成率実験データを取得 **成果③**

- 約100 MeV陽子を入射した鉄・鉛・ビスマス標的の中性子生成率を測定、計算モデルの精度を検証した。
- MEXT原子カシステム研究開発事業「FFAG陽子加速器を用いたADS用核データの実験的研究」(R1~R4)

107 MeV陽子を厚い鉛標的に入射したときに発生する中性子のエネルギー分布

ADS設計に必要な高エネルギー核データ高精度化に資する実験データを充足



- ✓ 2020年度 日本原子力学会 論文賞受賞
- ✓ the JNST Most Popular Article Awards 2021
- ✓ プレス発表 (2020/7/1)

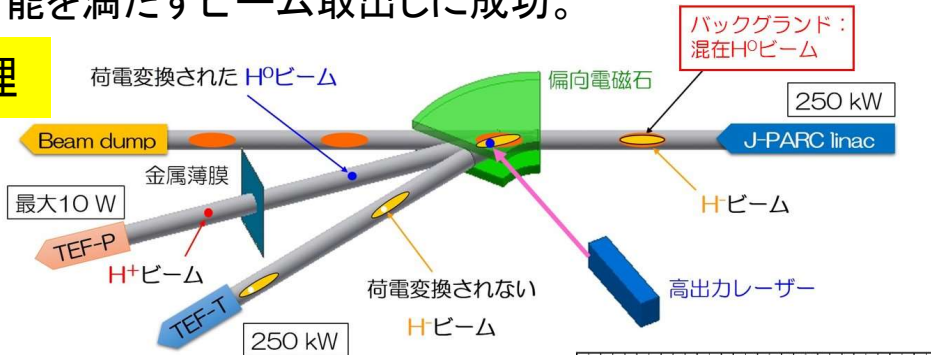
H. Matsuda, S. Meigo, Y. Iwamoto, et al., J. Nucl. Sci. Tech., 57, pp. 1141-1151 (2000), DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1771453>

- ✓ 2022年度 日本原子力学会 論文賞受賞
- ✓ H. Iwamoto, et al., J. Nucl. Sci. Tech., 60, pp. 435-449 (2000), DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2022.2115423>

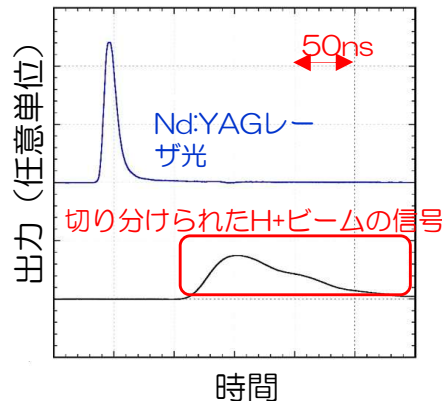
■ レーザーにより大強度陽子ビームから微小なビームを切り分ける技術を確立 **成果④**

- 核変換実験施設に必要な陽子ビーム制御技術。
- 大出力負水素イオンビームにレーザを照射することにより出力が約4桁小さな微小出力陽子ビームを安定的に取り出すレーザ荷電変換技術の世界で初めて開発した。
- 加速器を利用した実陽子ビームによる試験で要求性能を満たすビーム取出しに成功。

原理



試験結果



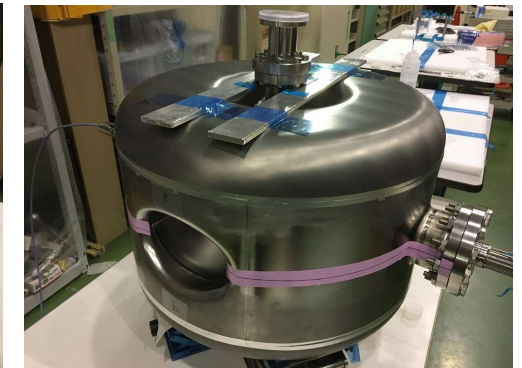
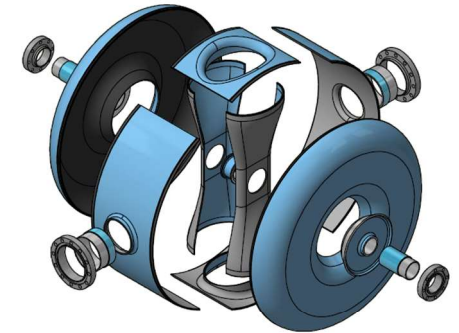
**実験施設の成立性に
係る技術を実証**

✓ プレス発表 (2020/12/14)

H. Takei, K. Tsutsumi, S. Meigo, J. Nucl. Sci. Tech. (Dec. 2020). DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1848654>

■ ADS用超伝導加速空洞の試作 **成果⑤**

- ADSの実現に必要な超伝導加速器開発の一環として、超伝導加速空洞を試作中。
- ニオブ平板を切断、プレス曲げ加工で部品製作。
- 現在、電子ビーム溶接により部品を組立中。



- 溶接組立未完だが、仮組みして共振周波数を測定。
- 共振周波数測定値 (334.40 MHz) はシミュレーション (335.16 MHz) と良く一致。
- 共振周波数の設計値である324 MHzに対し、十分に調整範囲内であることを確認。

**ADS開発の枢要技術開発の見通し、
J-ARCの将来計画にも貢献**

- 物質・生命科学実験施設(中性子):
 - 多岐にわたる分野で、産業利用も含めた特筆すべき成果を多数創出。
 - 中性子ホログラフィーなどの新しい測定技術を確立。
- 物質・生命科学実験施設(ミュオン):
 - 文理融合研究などの新しい研究分野を開拓。
 - TESを用いた超高精度カロリメータやミュオン加速など技術開発を推進。
- ハドロン実験施設:
 - 世界最大強度のK中間子ビームを実現。
 - 新しい測定器や測定技術を活かして高精度の実験を展開。
- ニュートリノ実験施設:
 - 世界最大強度のニュートリノビームを用いてニュートリノのCP対称性を表す位相角を世界で初めて測定。
- 核変換:
 - 実験施設実現に向けた鍵となる技術を実証。
 - 陽子ビームを利用し、ADS実現に向けた研究開発を推進。

補足

MLFのその他の成果例

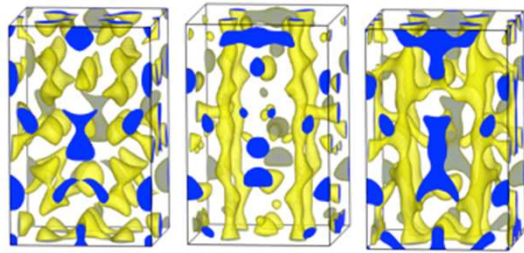
MLFでの成果例⑤: 全固体Li蓄電池材料開発

東京工業大学、KEK物構研、東京大学、J-PARCセンター

Science 2023 IF: 63.832
11,663 download

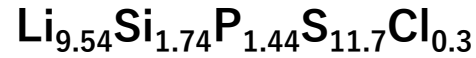


Nature Materials 2011

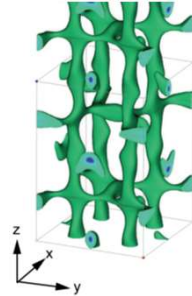


a b c

リチウムイオンが三次元方向に拡散する場合に高いイオン伝導を示す。ただし、高温にする必要あり。



Nature Energy 2016



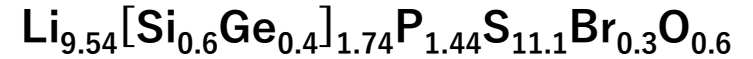
x y z

リチウムイオンが室温でも三次元方向に拡散する物質を発見。

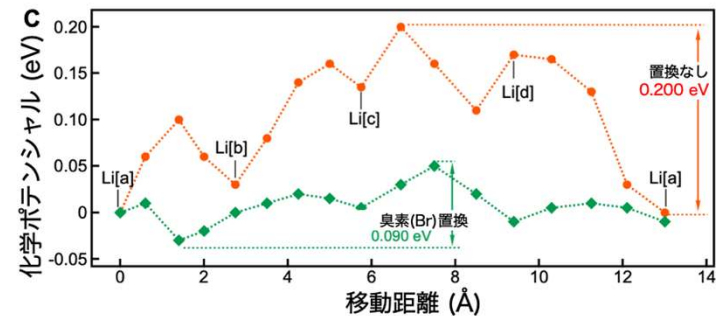
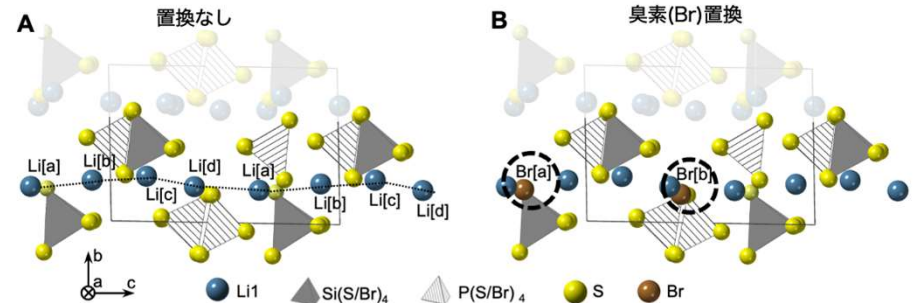
東工大、KEK物構研、トヨタ自動車、茨城県、茨城大、J-PARCセンター

被引用数 3,000回以上 (2篇合計)、TOP 0.01%以下

中性子回折によるリチウムを含む元素の位置の解析が、リチウムイオン拡散メカニズムを理解することに繋がり、全固体電池開発に貢献



電極面積あたりの容量が現行の1.8倍の厚膜正極を作製し、リチウム金属負極と組み合わせ、大容量・大電流特性を示す全固体電池を実現。



新材料の高いイオン伝導が、複雑で不規則性の高い元素分布を有した結晶構造に由来することを解明

成果例⑥: 太陽光エネルギーの吸収が水素原子1つで変わる

2022.12.21 プレスリリース 太陽光エネルギーの吸収が水素原子1つで変わる！タンパク質中で色が変わる色素の水素原子の可視化に世界で初めて成功

茨城大学、宮崎大学、久留米大学、久留米工業高等専門学校、
Technical University Munich等

J. Biological Chemistry (2023) IF: 5.485

- 光合成生物であるシアノバクテリアには、太陽光エネルギーを効率的に吸収するためのアンテナとなるタンパク質が存在し、吸収する光の波長はタンパク質に含まれる色素に依存
- 色素の色の違い（吸収する光のエネルギー帯の違い）が水素原子の個数に依存することが予想されていたが、個数を特定できていなかった

中性子回折による水素位置の解析および量子化学計算を実施

色の違いが、水素原子1つの違いによるものであることを世界で初めて可視化

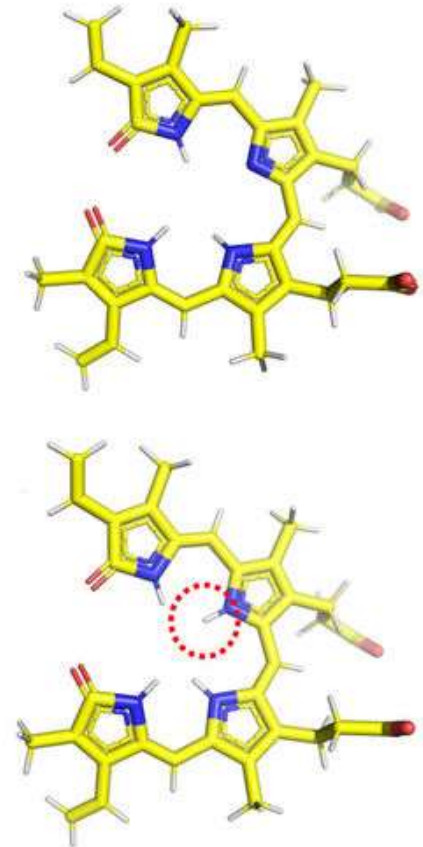
広いエネルギー範囲の太陽光を効率よく吸収するための化合物の合成や、微妙な色の違いを出す染料などの合成に役立てられることが期待



変異体A



変異体B



水素原子の違い1個による色の違い

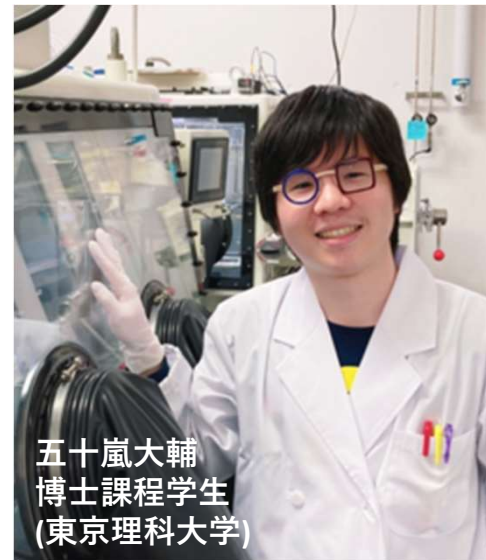
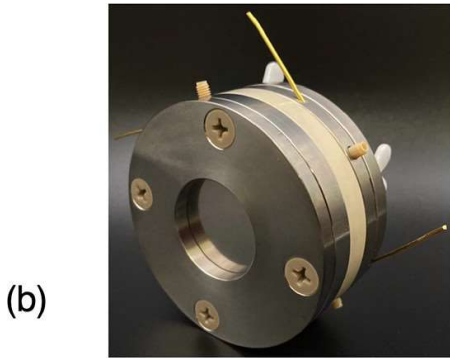
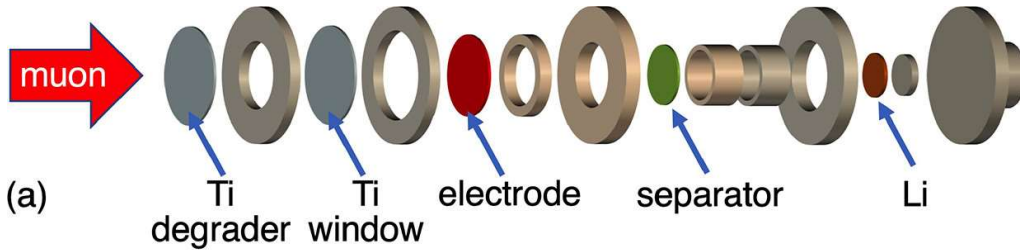
成果例④: リチウムイオン電池のオペランド測定

2022.10.19 プレスリリース 充放電中のリチウムイオン電池内でリチウムイオンの運動を初測定

IF: 6.959

リチウムイオン電池内のイオン拡散の研究

1098 アクセス、被引用件数:2



五十嵐大輔
博士課程学生
(東京理科大学)

プレス
日刊工業新聞

27 10月25日・火曜日 2022年(令和4年)

リチウムイオン運動測定

充放電中 電池内 電極作製法を最適化

総合科学研究機構 池の材料探索および電極作製法の最適化に「RC」で「ミュオン」を用いた手法を用いて、充放電中の正極材料中のリチウムイオン運動を初めて成功した。

正極中において、リチウムイオンが拡散する速さを示す自己拡散係数を求め、これがリチウムイオン濃度に依存することを示した。次世代電池において、リチウム電池性能を決める重要な要素だが、従来手法では電極作製法や充放電材料固有の拡散係数を求めるのは難しかった。そこで、大強度陽子加速器施設「J-Parc」の中核研究機関である総合科学研究機構と、東京理科大学大ビン回線装置(HRS)で「ミュオン」を用いた手法を用いて、充放電中の正極材料中のリチウムイオン運動を初めて成功した。

イオンの拡散係数は、μSRの測定結果から、リチウムイオン濃度の減少に従って増えることを示した。μSRは、試料に注入されたミュオンが崩壊時にスピン向きに放出する陽電子電子を放出することで、ミュオンスピンの向きが磁場を感知して起す配向変化を求め、物質内部の微小な核磁場の揺らぎや磁気的状態を調べられる。

科学技術・大学

充放電を行いつつながらμSR測定をするための電池容器 (中性科学センター提供)

リチウムイオン電池を充放電しながら、μSRスペクトルを測定

Li_xCoO_2 中のLiの自己拡散係数を求めることに成功 ($0.2 < x < 0.9$)

リチウムイオン電池内のリチウムの動きを詳細に調べる手法の開発
→電池の性能の向上に貢献

Operando Muon Spin Rotation and Relaxation Measurement on LiCoO_2 Half-Cell

K. Ohishi et al., ACS Appl. Energy Mater. 5, 12538 (2022).