

2024/11/1

第15回FC-Cubicオープンシンポジウム
@アイヴィル

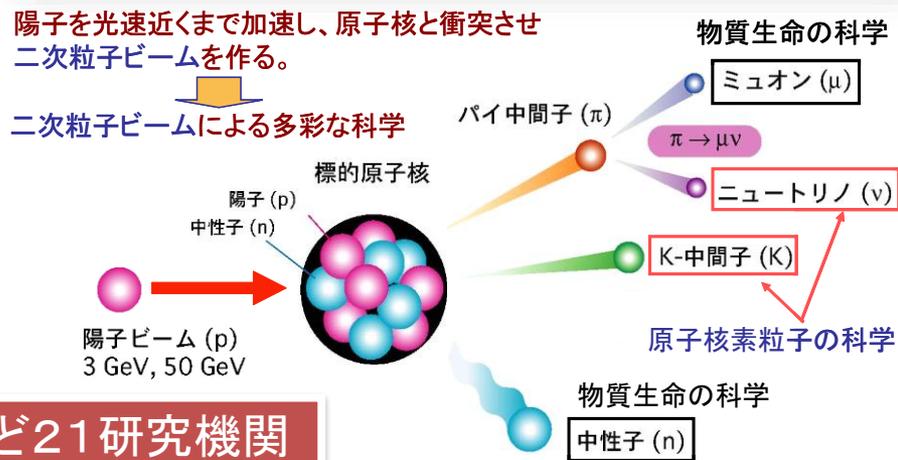
J-PARCの概要

小林 隆

J-PARCの概要

➤ Japan Proton Accelerator Research Complex

- 日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が建設した、**世界最高レベルの陽子加速器**により様々な分野の最先端の研究を展開する施設
- 物質科学、生命科学、原子力工学 (JAEA)、原子核・素粒子物理学 (KEK) など**広範な研究分野**を対象に、
- 中性子、ミュオン、ニュートリノなどの**多彩な二次粒子**を用いた新しい研究手段を提供し、
- **基礎科学から産業応用まで**様々な研究開発を推進する



連携研究機関: 国内 東大・京大・東北大・阪大・茨城大など21研究機関
国外 47研究機関

大強度陽子加速器施設: J-PARC

J-PARC Facility
(KEK/JAEA)

South to North

東海村

光速の70%

400MeV Linac

3 GeV RCS

光速の97%

ニュートリノビーム
(神岡方面)

30GeV MR
周長 1.6km

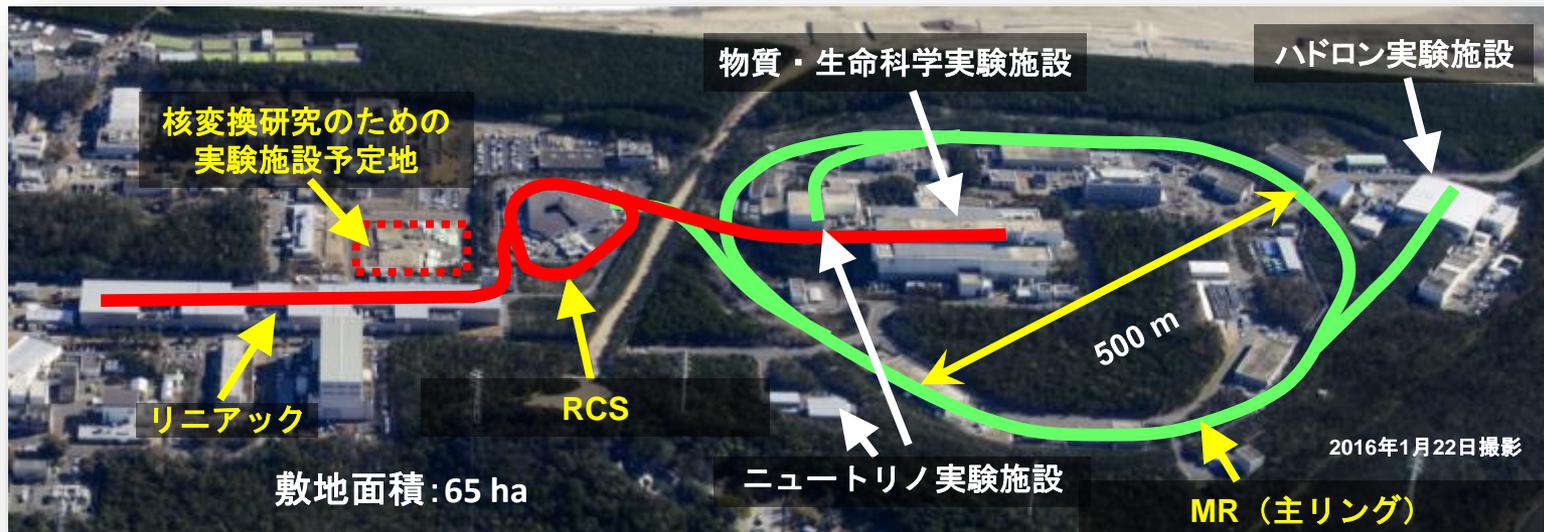
数100兆個の陽子を約1.5秒で
約20万回周回させ光速の
99.95%まで加速

- CY2007 Beams
- JFY2008 Beams
- JFY2009 Beams



Bird's eye photo in January of 2008

3つの実験施設



物質・生命科学実験施設

- 新物質、新材料の機能を応用や産業利用まで幅広く研究
- 中性子、ミュオン



ニュートリノ実験施設

- ニュートリノ振動の測定で宇宙と物質の起源を探る
- ニュートリノビームを東海から

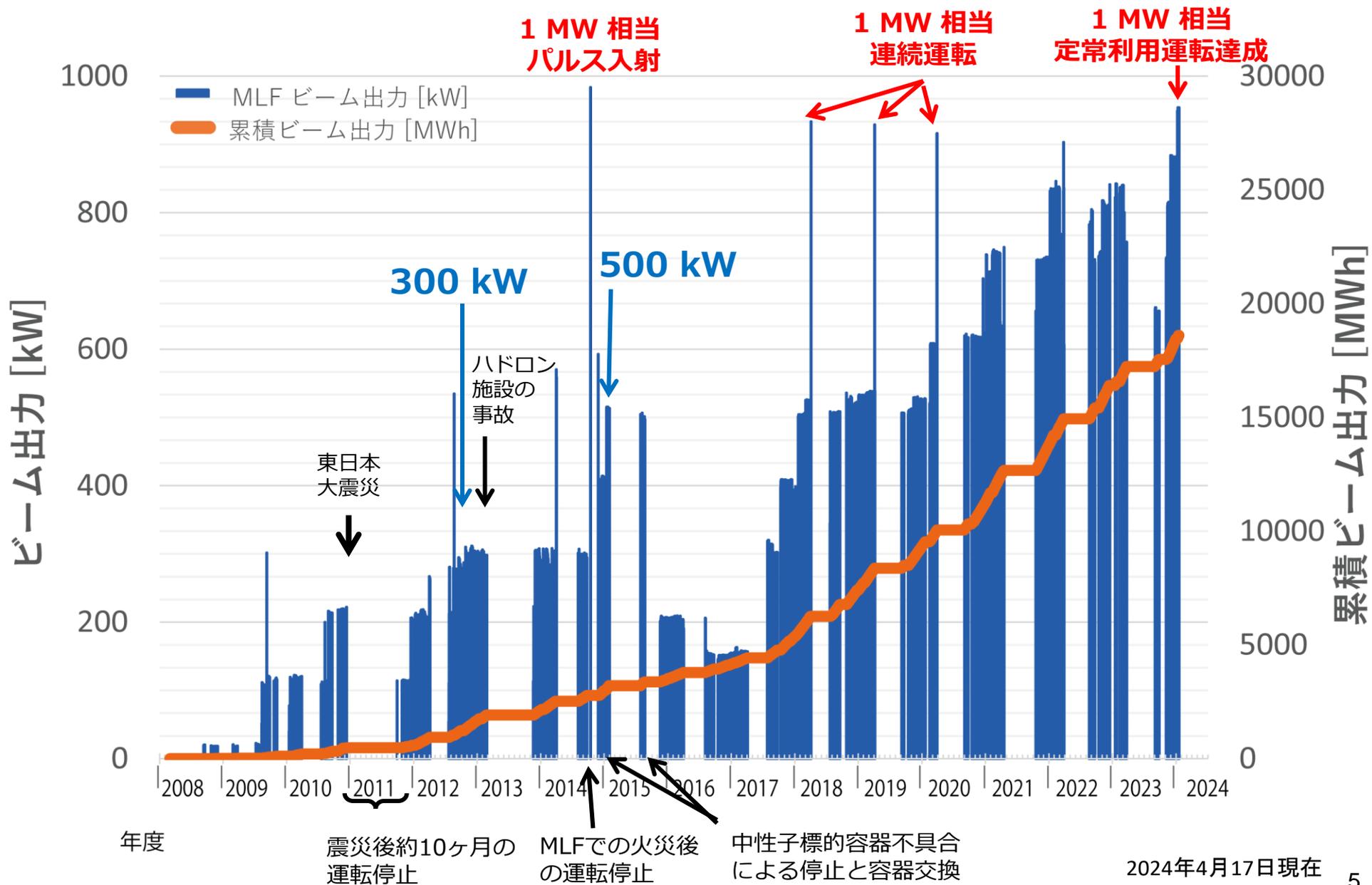


ハドロン実験施設

- 物質の起源、形成、進化の謎
- 素粒子・ハドロン・原子核に関わる多様なテーマの実験を展開



MLF中性子源のビーム運転履歴



物質・生命科学実験施設 中性子強度

2024.05.31 プレスリリース

世界最強のJ-PARC MLFのパルス中性子源が目標性能を達成

- 世界一の強度で長期運転を実現 -

パルス当たりの中性子強度 J-PARCが断然世界一に！



J-PARC

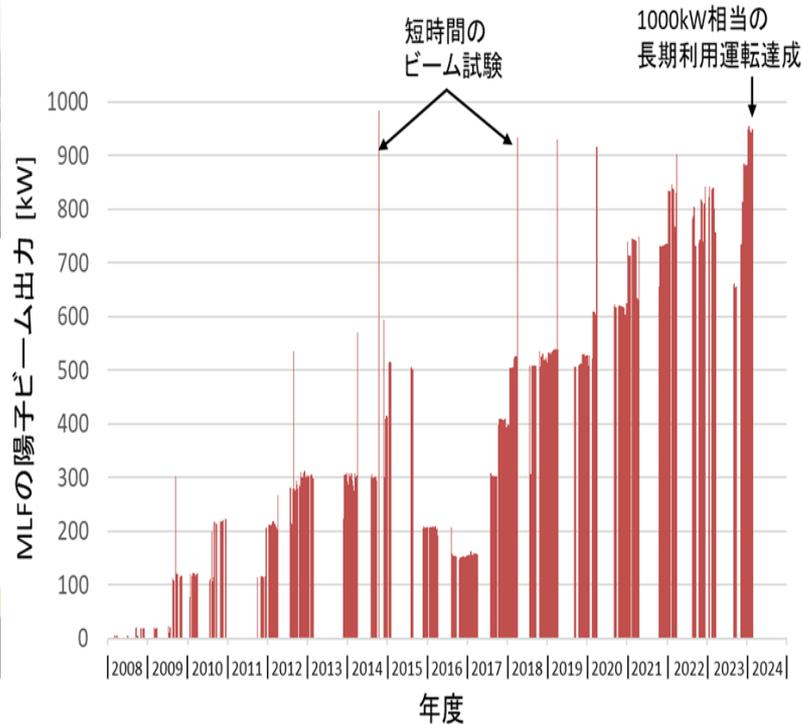
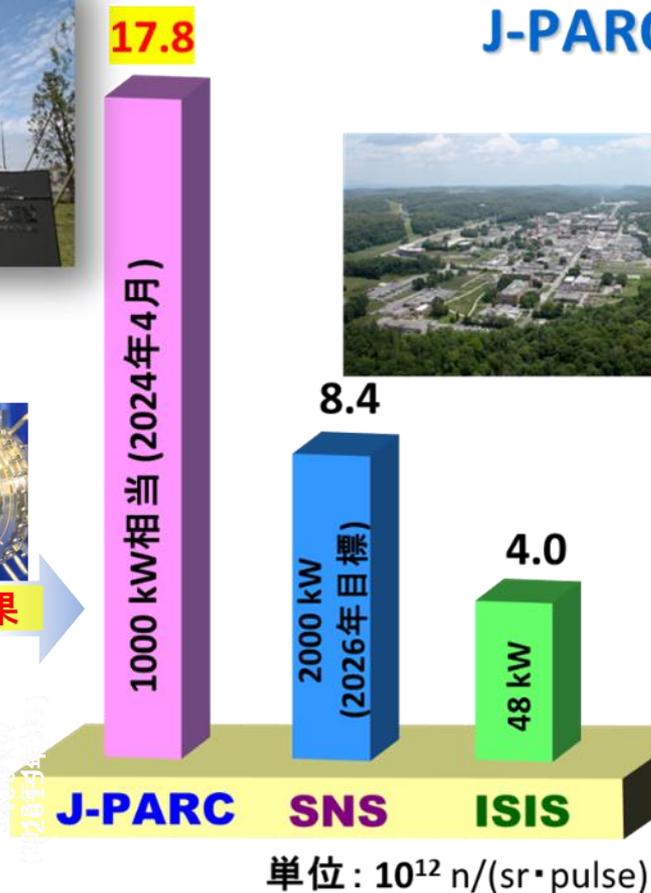
JAEAの技術開発

高性能水銀標的容器



原子力技術の成果

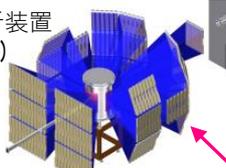
高性能 結合型減速装置



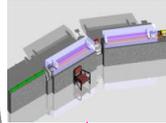
物質・生命科学実験施設

中性子実験装置: 21台が稼働中 (K: 8, J: 4, C: 7, I: 2)

特殊環境中性子回折装置
(KEK, 京大, NEDO)



中性子共鳴スピン
エコー分光器群
(KEK, 京大)



中性子核反応測定装置
(東工大, JAEA, 北大)

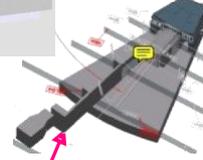
茨城県生命物質
構造解析装置
(茨城県)



超高分解能粉
末回折装置
(KEK)



中性子光学基礎物理
実験装置 (KEK)



CROSS
超高压中性子回折
装置 (東大, JAEA)



中性子源特性
試験装置 (JAEA)

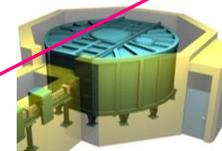
BL08 SuperHRPD

BL09 SPICA

BL06 VIN ROSE

BL05 NOP

CROSS
ダイナミクス解析装置
(JAEA: 共用)



高分解能型チョッ
パー分光器 (KEK)



BL10 NOBORU

BL11 PLANET

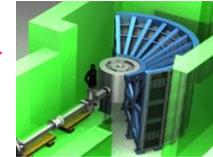
BL12 HRC

BL04 ANNRI

BL03 iBIX

BL02 DNA

CROSS
4次元空間中性子
探査装置
(JAEA, KEK,
東北大: 共用)



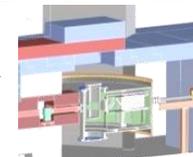
陽子ビーム



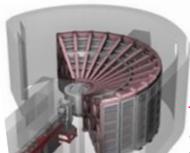
Proton beam line

中性子源

偏極中性子チョッパ
型分光器
(KEK, 東北大)



冷中性子ディスク
チョッパー型分光器
(JAEA)



D1 Instruments

D2 Instruments

BL14 AMATERAS

BL15 TAIKAN

BL16 SOFIA

BL17 SHARAKU

BL23 POLANO

BL22 RADEN

BL21 NOVA

BL20 iMATERIA

BL19 TAKUMI

BL18 SENJU

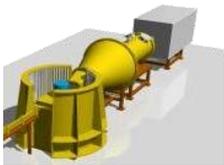
CROSS
エネルギー分析型中性
子イメージング装置
(JAEA: 共用)



高強度全散乱装置
(NEDO, KEK)

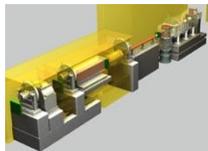


CROSS
大強度型中性子
小中角散乱装置
(JAEA: 共用)

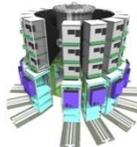


ソフト界面解析
装置 (KEK)

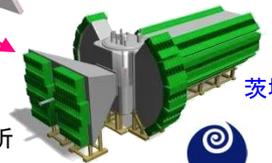
CROSS
試料垂直型偏極中性子
反射率計 (JAEA: 共用)



CROSS
特殊環境微小単結晶中
性子構造解析装置
(JAEA: 共用)



工学材料回折
装置 (JAEA)



茨城県材料構造
解析装置
(茨城県)



ミュオン実験施設

多彩かつ世界最大強度のミュオンビームを用いた幅広い科学:物質・生命科学～基礎物理

➤Sライン:一部稼働

- 低速(4 MeV)の正ミュオン
- 複数のエリアで同時に、ミュオンspin回転法(μ SR)を用いた多彩な物質科学研究等を展開
- S1エリア:2017年4月ユーザー利用開始
- S2エリア:2021年7月稼働
- S3-S4:建設中

➤Hライン:一部稼働

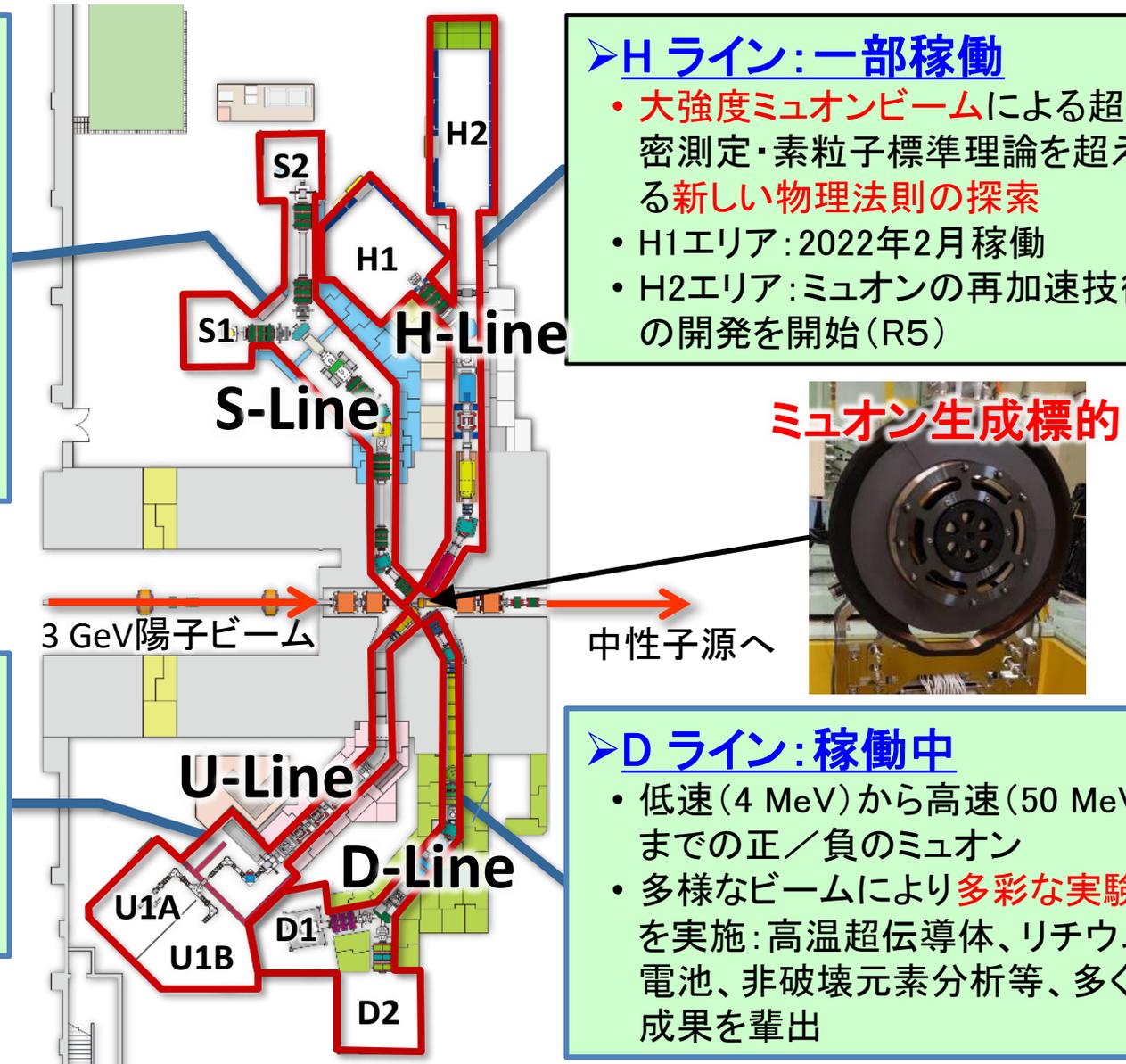
- 大強度ミュオンビームによる超精密測定・素粒子標準理論を超える新しい物理法則の探索
- H1エリア:2022年2月稼働
- H2エリア:ミュオンの再加速技術の開発を開始(R5)

➤Uライン:最終調整中

- 超低速(0.1~30 keV)の正ミュオンを利用
- 独自の技術でナノメートルの分解能を実現、物質の表面・界面の研究を展開

➤Dライン:稼働中

- 低速(4 MeV)から高速(50 MeV)までの正/負のミュオン
- 多様なビームにより多彩な実験を実施:高温超伝導体、リチウム電池、非破壊元素分析等、多くの成果を輩出



ミュオン生成標的

中性子源へ

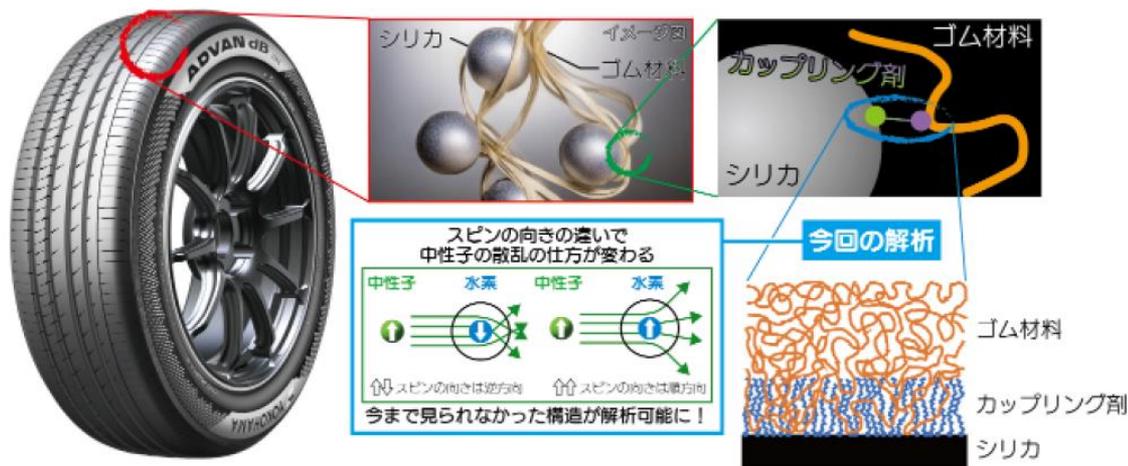
MLFでの成果例：タイヤ高性能化の機構を解明

J-PARCセンター、山形大学、総合科学研究機構、三重大学
横浜ゴム株式会社、京都大学

J. Phys. Chem. C (2024)
10.1021/acs.jpcc.4c00963

- 自動車用のタイヤのグリップ性能と燃費性能といった力学特性は、ゴム材料にシリカナノ粒子を加えるとともに、これら異種材料の結合を強くするためのカップリング剤を添加して達成している。
- 複合材料の力学特性は両者の結合の強さに依存するが、従来の手法では、ゴムとシリカの界面でカップリング剤がどのように機能しているかを調べることはできなかった。

- 開発したスピンコントラスト変調中性子反射率法を適用
- シランカップリング剤の単分子層を観測し、その詳細な構造や組成を解析
- 同時コート試料では、ポリブタジエン層とシランカップリング剤層が強固に結合し、順次コート試料では層間の結合が弱いことが判明



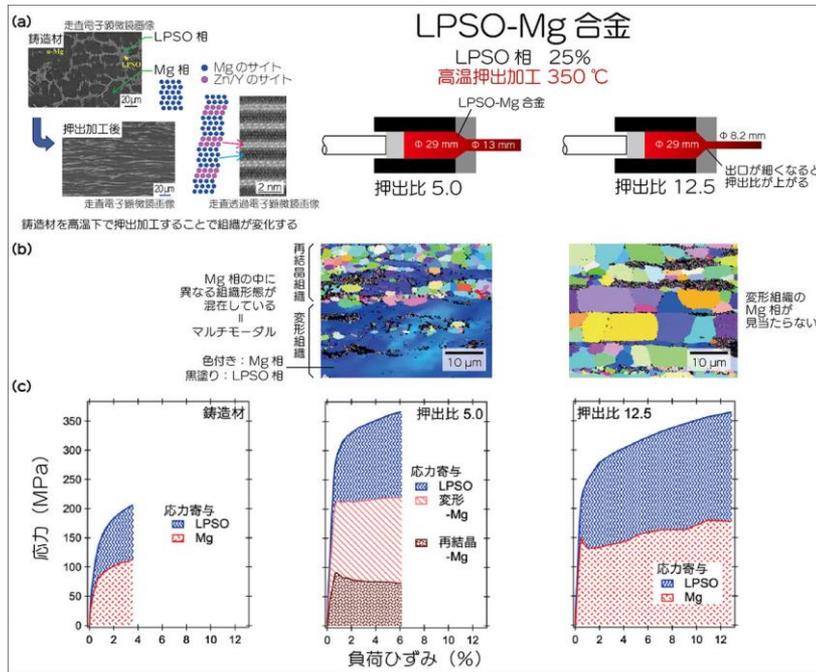
中性子と水素のスピンを利用して ゴム材料とシリカの結合状態を解明

- ゴム、シリカ、シランカップリング剤の結合状態が、タイヤの耐摩耗性に大きな影響を与えることが明らかに
- 耐摩耗性が向上した新しいタイヤの開発が期待される

物質・生命科学実験施設 主な成果 中性子

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

熊本大学で開発されたMg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い。高温押出加工による強度向上のメカニズムをその場中性子回折実験で解明。

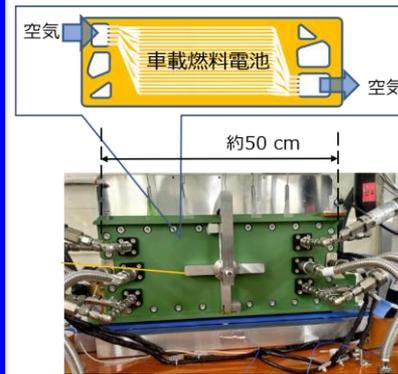


- 構成相それぞれの組織発達が異なり、合金全体の強度と延性に大きく影響していることを明らかに。
- 航空機や自動車部品等への展開が期待される。

令和5年8月15日プレス発表

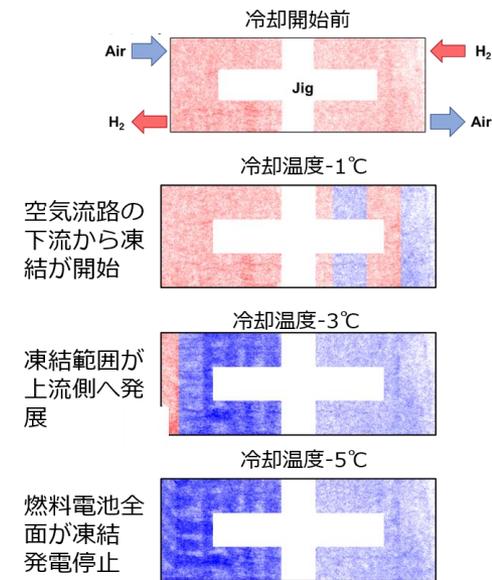
世界初、中性子で車載用燃料電池内部の 水の凍結過程を観察

発電時水を発生する燃料電池(FC)。氷点下環境での性能向上が課題。エネルギー分析型中性子イメージングにより可能となった水・氷識別技術により、発電中のFC内部を直接観察。



右図 稼働状態のFCの
水/氷識別画像

赤: 液体の水
青: 凍結した水
色の濃さは水の量を表現



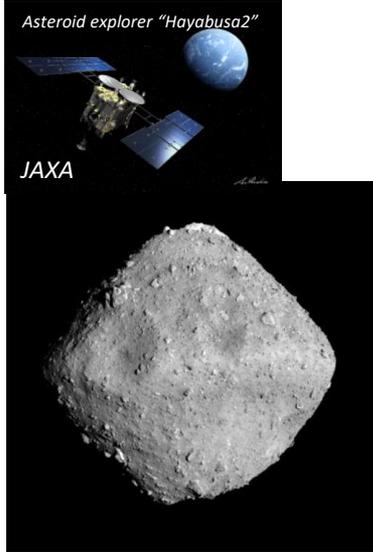
- 発電中の車載FC内部で水が凍結し、発電性能が低下する過程を明らかに。
- 氷点下におけるFCの始動方法の最適化、材料・流路のコンセプトの立案とその検証など、FC研究開発における様々な展開が期待される。

令和6年3月14日プレス発表

物質・生命科学実験施設 主な成果 ミュオン

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

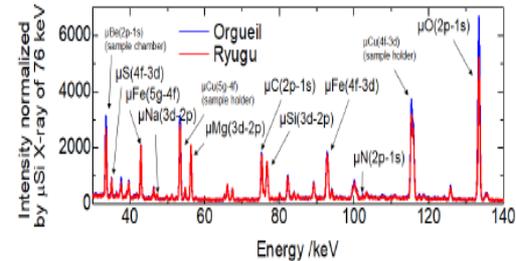


小惑星リュウグウ (画像提供: JAXA、東大など)



- 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
- およそ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要素組成が明らかに
- これまで最も始原始的と言われていた隕石の組成と近いものの、酸素の含有量が明確に少ないことが判明

○世界的な雑誌「サイエンス」に掲載



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

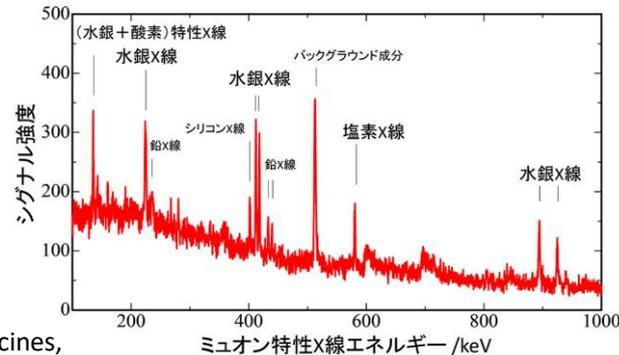
ミュオンビームによる医療文化財の分析に成功

○ 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

Shimada-Takaura K. et al., Journal of Natural Medicines, 75:532-539 (2021)



緒方洪庵晩年期使用薬箱 (提供: 大阪大学 高橋京子) 11

将来計画



令和5年度 J-PARC中間評価

第2回 作業部会

前回中間評価の主な指摘事項に対する対応(1)

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



- “MLF-double”
- 実効強度2倍
- 第2ターゲットステーション(~2030's)
- n : x20, mu: x50~100
- 新たなイノベーション、ブレークスルーを生むためには“道具”(装置)の発明/改良が重要
- 人材育成のチャンス



MLFの将来計画(短・中期)

ID:高度化
ID:その他④

現行ターゲットステーション(TS1)の高度化による成果最大化



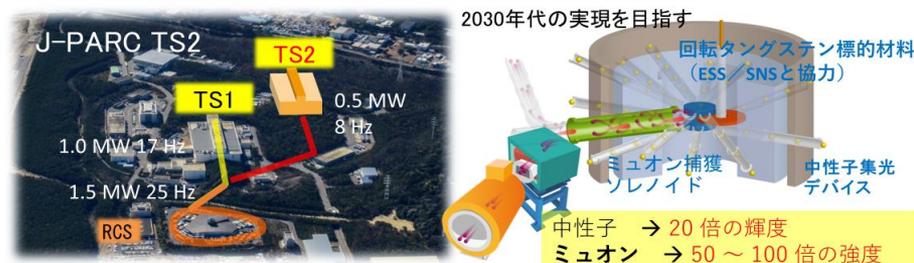
2030年までにTS1での実効的強度2倍を目指す



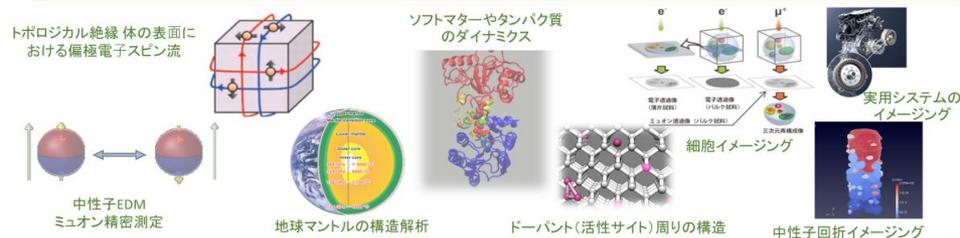
MLFの将来計画(中・長期)

ID:高度化

世界初の中性子・ミュオンを一体化した新たなターゲットステーション(TS2)の実現



TS2の高輝度中性子/高強度ミュオン微小ビームを用いたサイエンス



J-PARCにおける素粒子・原子核実験



Super Kamiokande

Neutrino Experiment : T2K
~Mixing Angle, CP phase, and Mass Hierarchy~



new particle ν_s ?

Hyper-nuclear physics

Strangeness in Nuclei

Role of strange quark in extreme high density matter?

Hadron Experiments

~CP beyond CKM; Mass modification~

Hadron properties in Nuclear Matter

Hadron Hall

105MeV

Flavor&CPV in charged lepton?

Search for $\mu \rightarrow e$ conversion

KOTO

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CPV beyond CKM

CPV in Charged Lepton?

$g_\mu - 2/\mu$ EDM

Ultra cold μ^+ source Muon LINAC (300 MeV/c)

3GeV RCS

FX beam

MLF



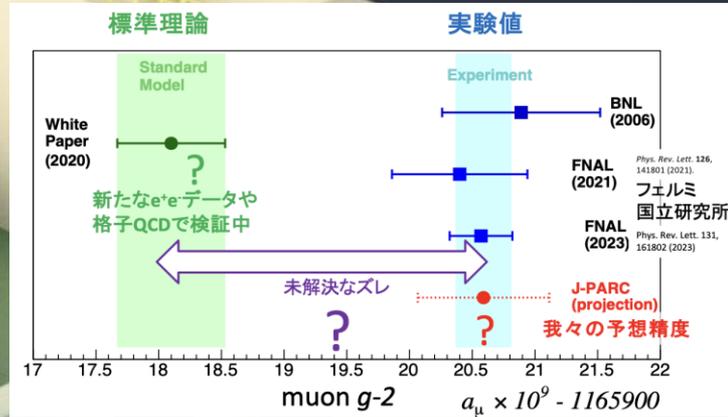


将来に向けた高度化:ミュオンg-2/EDM実験

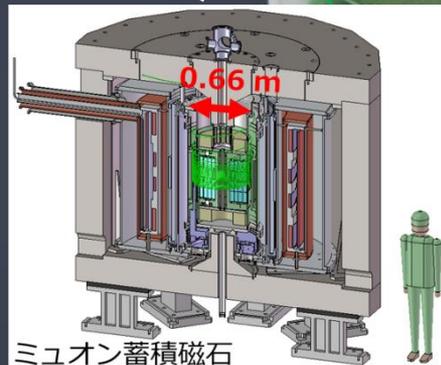
~2028開始予定

- 冷却・加速による新しいミュオンビームにより
- ・ コンパクトな蓄積磁石・検出器(1/20)
 - ・ 微弱ビーム収束力で蓄積(1/1000)
 - ・ 高いビーム入射効率(x10)
- が可能となる。

ミュオンg-2の測定値と理論の比較



J-PARCはBNL・FNALの結果を検証できる唯一の実験施設

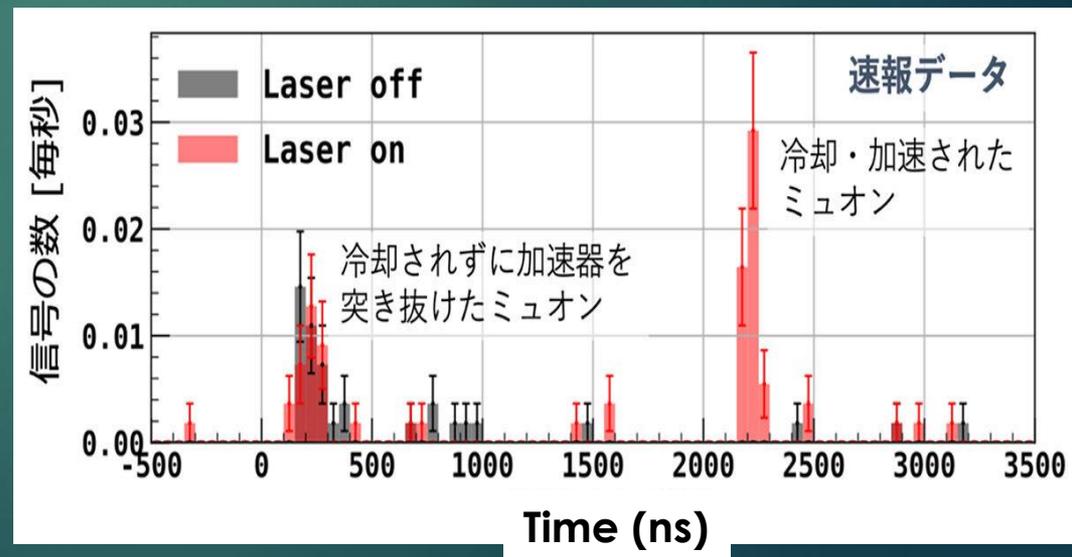
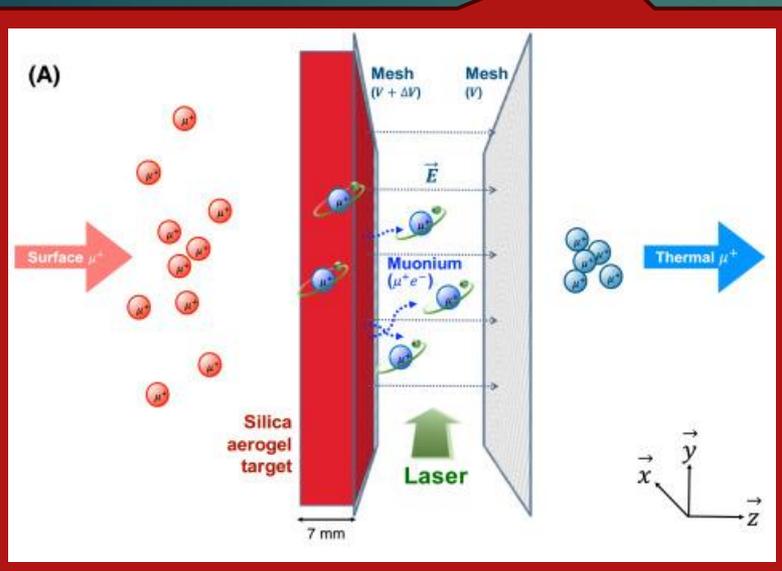
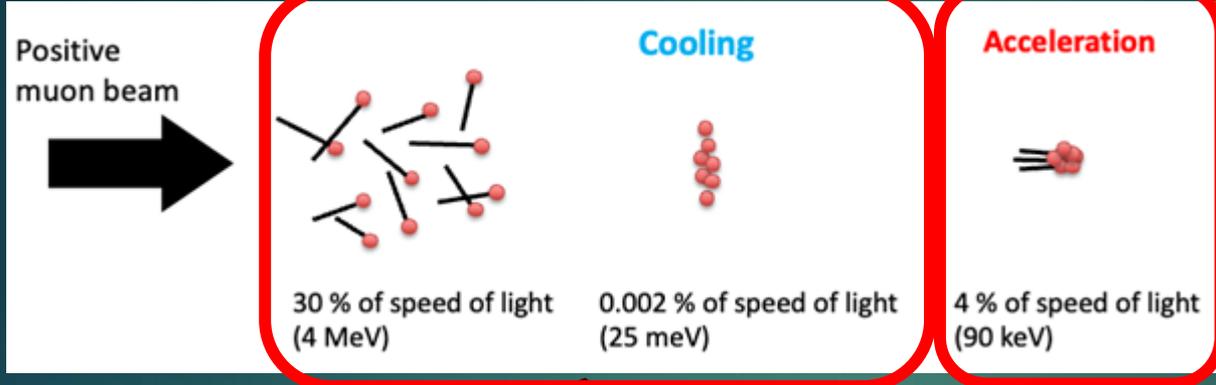


ミュオン蓄積磁石
ミュオンg-2とEDMを同時に精密測定



世界初、素粒子ミュオンの冷却・加速に成功 - ミュオン加速元年、ついにミュオン加速器の実現へ -

2024.05.17



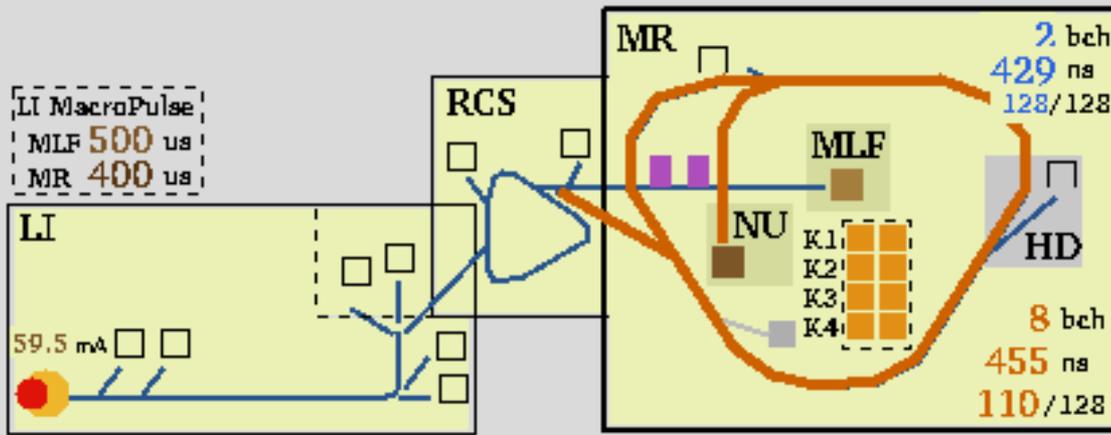
主リング800kW安定運転達成！



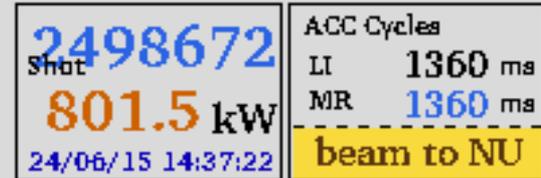
Beam Destinations of Accel. Run 91

24/06/15 14:37:22

Ver.2.15 (Jan.2024)



MR Beam Cycle and Mode



MLF Beam Information

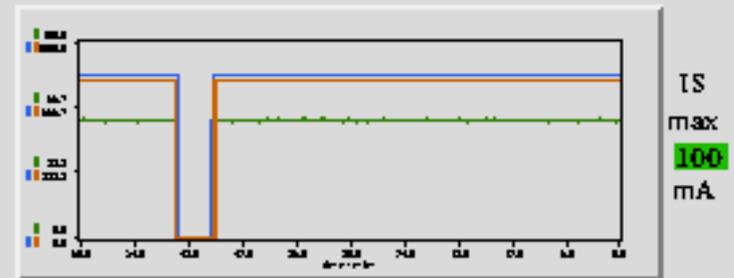


LI	
LI BD 90deg	
LI BD100deg	
LI BD 30deg	
LI BD 0deg	
LI MEBT1	
LI LBFT	

RCS	
3NBTD AC	
3NBTD DC	
RCS H0 Dmp	
MLF	
MLF TGT	

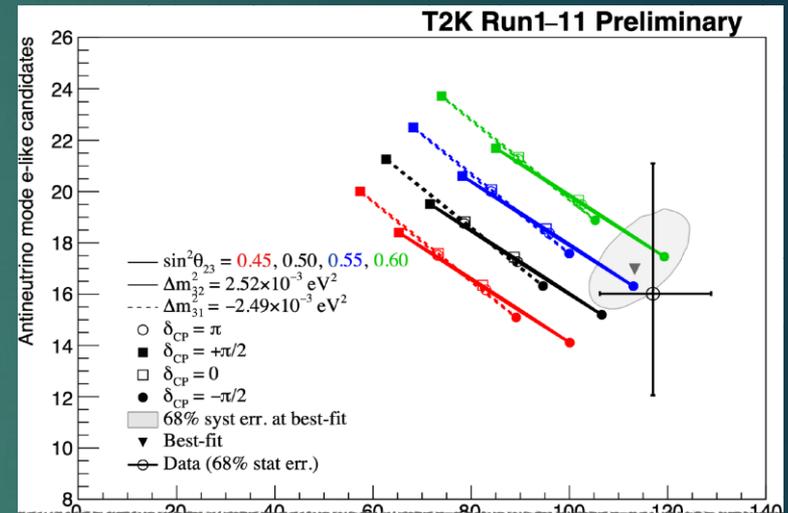
MR	
MR ExtAbt	
MR InjDmp	
NU	
NU(N TGT)	
HD	
HD(K TGT)	

Power Trend (1 hour) <MLF 1MW/MR 1MW>



ニュートリノ実験 東海to神岡(T2K)実験(2010~)

宇宙の物質起源解明の糸口を探る



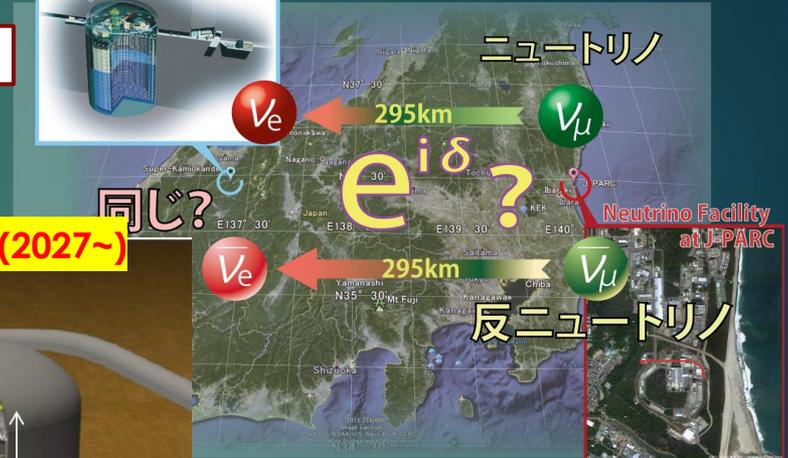
物質と反物質の
性質の違いを探る

- ▶ 陽子の数： $\sim 3 \times 10^{21}$ 個
- ▶ $\sim 90\%$ の確率でニュートリノと反ニュートリノの性質が異なるようだ

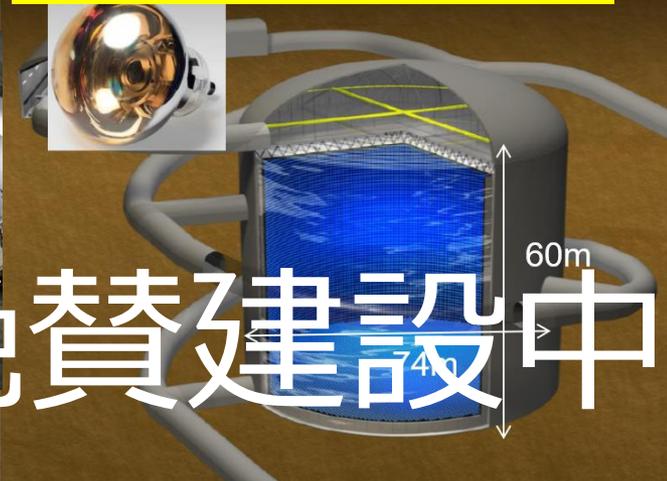
ニュートリノ実験：東海to神岡(Tokai-to-Kamioka) T2K実験から ハイパーカミオカンデ実験へ



T2K実験(2010~)



ハイパーカミオカンデ検出器(2027~)



絶賛建設中！



→宇宙の物質起源解明に迫る！

J-PARCで

中性子星内部の解明→新たな物質観の構築

中性子星

超新星爆発で

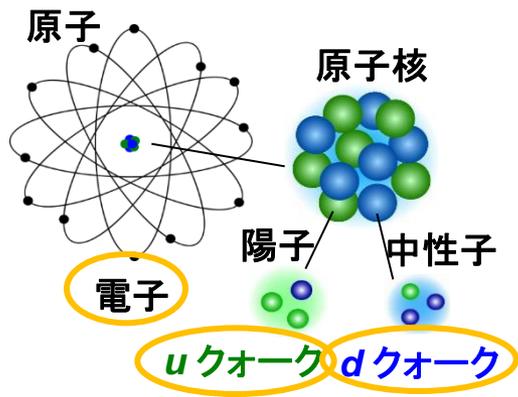
ブラックホールにならずに残った天体

質量: 太陽の1~2倍、半径: 約10km

→ 宇宙で最高密度物質 (太陽の300兆倍)

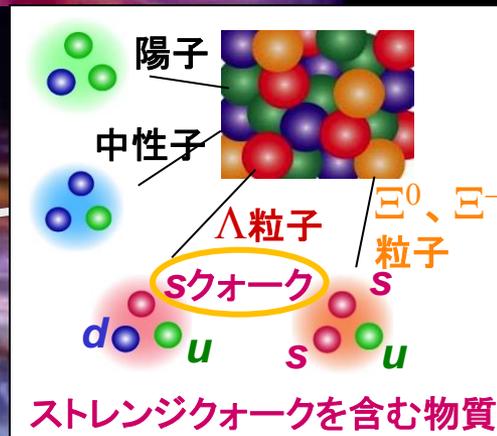
中心部は1cm³あたり1兆kg

内部は謎に包まれている

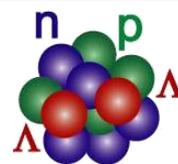


u,dクォークと電子
からなる物質

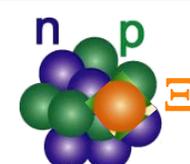
ストレンジ核物質?



sクォークを2個含む原子核



ΛΛハイパー核



Ξハイパー核

“中性子星”
を人工的に作る

核変換実現へ向けたR&D

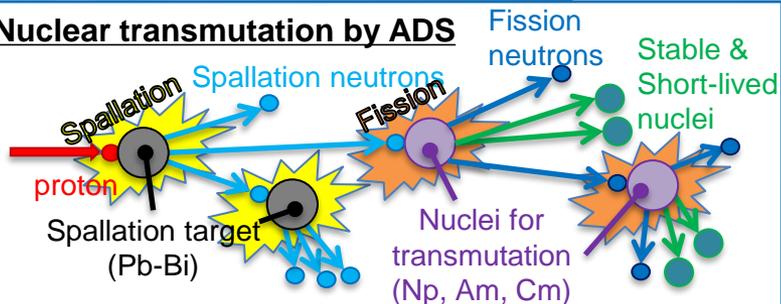
Accelerator Driven System (ADS)
for nuclear transmutation

high-intensity
accelerator

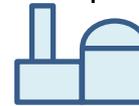
sub-critical
reactor

30-MW
proton
beam

Nuclear transmutation by ADS



Nuclear
power plants



High-level
radioactive
waste

Reduction by nuclear
transmutation with ADS

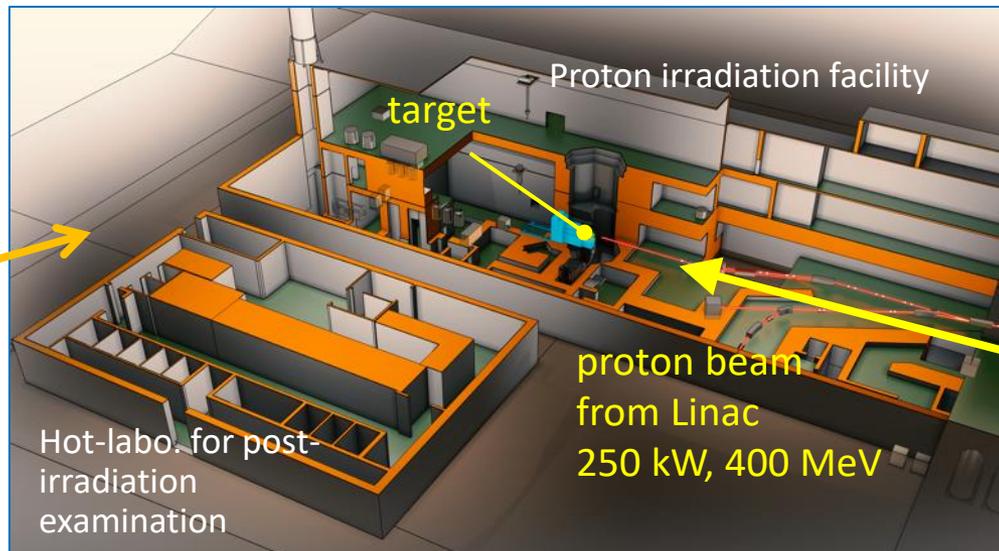


Promotion of nuclear
power use by solving the
problem of rad-waste



for contributing to
carbon neutrality

- Experimental facility for the ADS development and other purposes at J-PARC is under planning.



国際的研究拠点としての J-PARC

- 物質・生命科学 世界の3極の一つ。アジアオセアニア圏のハブ施設
- 原子核素粒子物理 世界的にもユニークなK中間子施設
- ニュートリノ物理 世界をリードする拠点



**国際化は
今後の重要課題！**

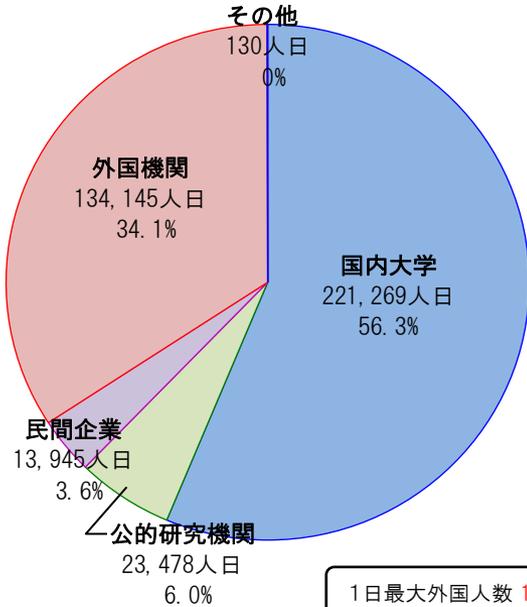
- n** ニュートリノのセンター
- n** 中性子のセンター
- HD** ハドロン (K中間子)
- μ** ミュオンのセンター
- HD** ハドロン (反陽子)

ISIS : 英国ラザフォード研究所、 SNS : 米国オークリッジ国立研究所
 CERN : 欧州合同原子核研究機構、 FNAL : 米国フェルミ国立研究所、 GSI : ドイツ重イオン研究所
 ESS : 欧州核破碎中性子源 (スウェーデン : 建設中、2023年稼働予定)、 CSNS : 中国高エネルギー物理研究所
 PSI : ポールシェラー研究所 (スイス)、 TRIUMF : カナダ国立素粒子原子核研究所

J-PARC ユーザー来所者数 (令和5年10月末現在)

ユーザーズオフィス
Users Office

所属機関別

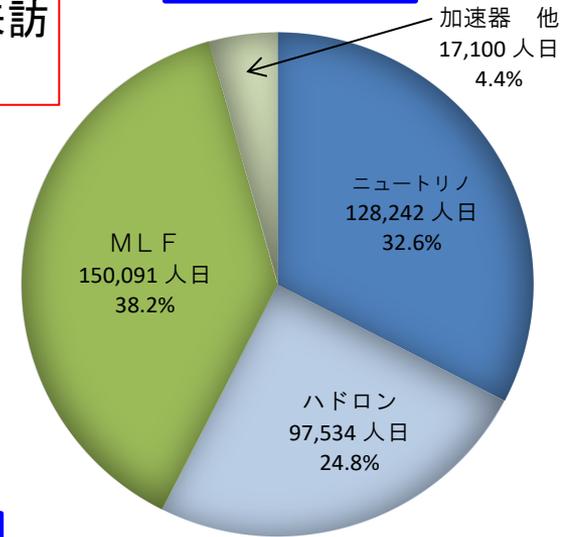


2008年12月の稼働開始以来、
多くのユーザーがJ-PARCに来訪
総数: 延べ **392,967人日**

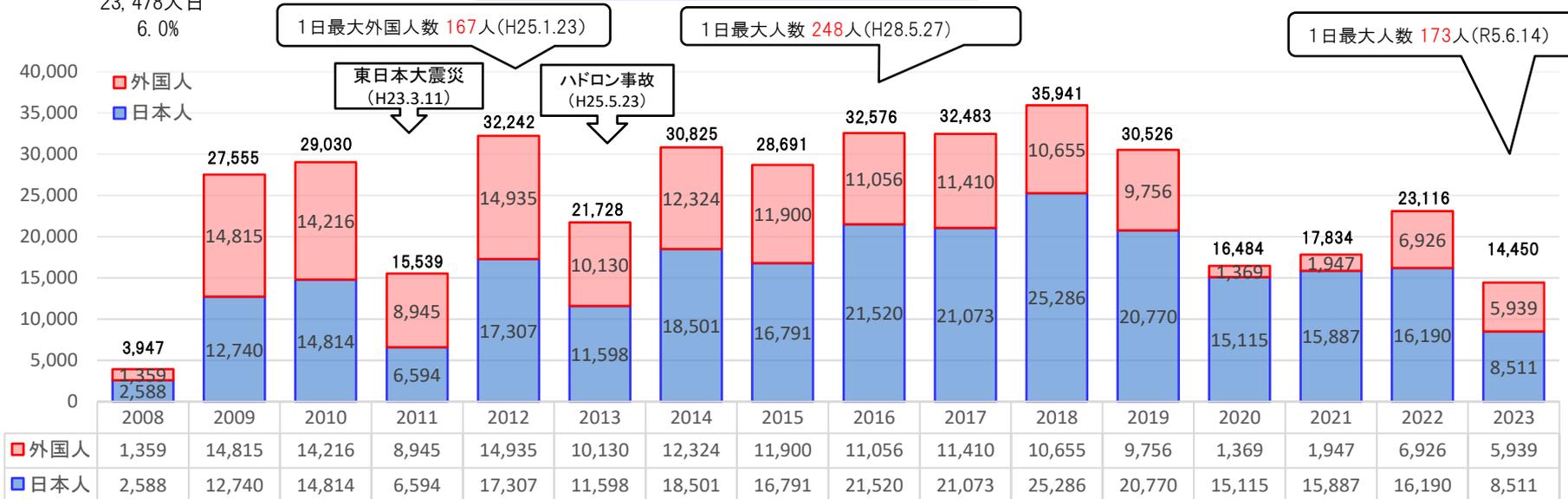


J-PARCを訪れた外国人ユーザー
(村長との交流会)

来訪施設別



外国人・日本人別来所者数推移 (人日)



J-PARCで探る物質、生命、宇宙のひみつ

- 宇宙に私たちはなぜいるの？
- 中性子星のなかはどうなってるの？
- いろんな物質の性質は？
- タイヤはもっとよく走って止まって長持ちさせたい！
- いろんなタンパク質って、なにからできてなにがちがうの？
- 夢の超伝導のひみつ？
- リチウム電池などカーボンニュートラル実現にむけた研究



さまざまな秘密を解明し、社会に貢献