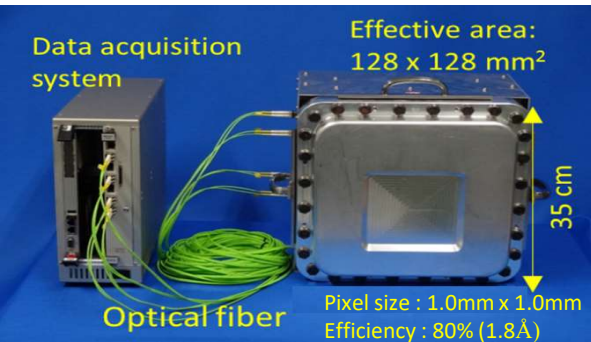


# TS1成果最大化のための高分解能化と大強度化の取組

## 大強度パルス中性子を最大限に活用するための2次元検出器・スーパーミラーの開発

### <sup>3</sup>Heガス型2次元検出器

MLF独自の高圧<sup>3</sup>Heガス封入/個別ライン信号読み出し技術を導入した、全性能に優れた**マルチワイヤ2次元検出器 (MWPC)**を開発している。



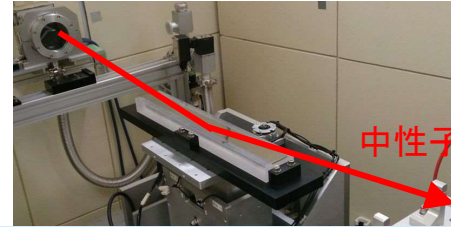
開発した個別ライン読み出し型2次元検出器システム

微細ピクセル(0.8mm)と感度一様性(10%)を実現

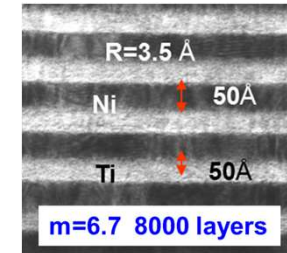
### 集光スーパーミラー

蓄積した精密基板加工、製膜技術を基礎として、装置に最適化した**楕円型集光スーパーミラー**を開発している。

開発した楕円集光型スーパーミラー(Ni/TiC)



- ★集光ビーム: 2.0 mm(V) x 1.15 mm(H)
- ★焦点間距離: 7430 + 3620 mm
- ★試料-検出器: 2500 mm

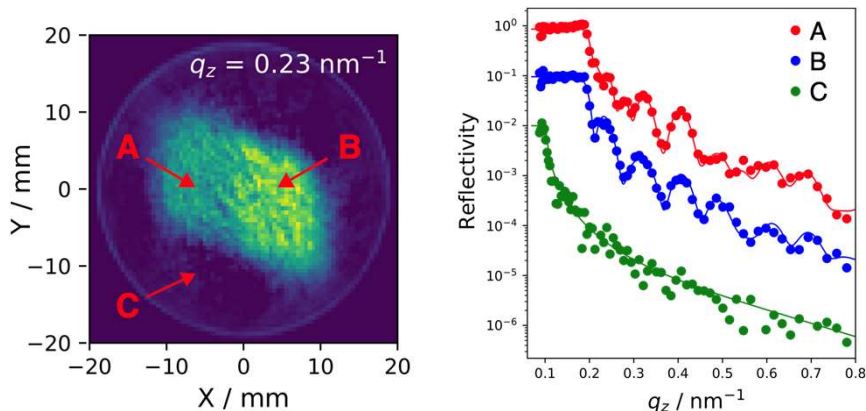


Ni/Tiスーパーミラー(TEM像)



イオンビームスパッタ(IBS)製膜装置

MWPCのBL17SHARAKUへの実装により中性子反射率トモグラフィ法を開発



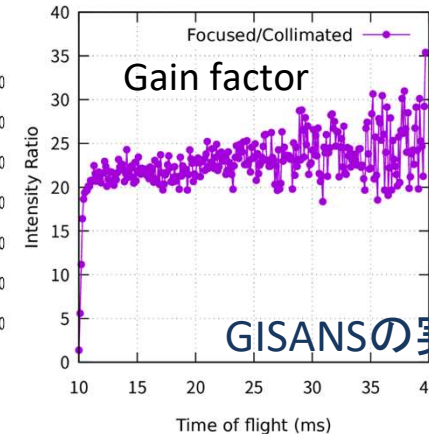
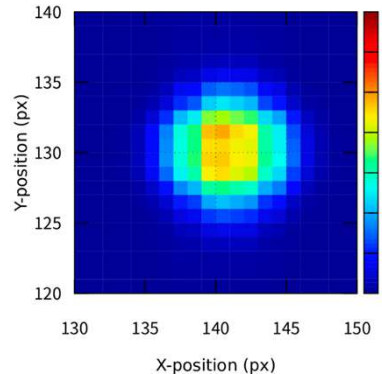
ミリメートルスケールの不均一性を有する試料のNR解析を可能に

BL17SHARAKU反射率計への実装



薄膜の面内構造を調べるために斜入射中性子小角散乱(GISANS)が必要。現行のゲイン5倍の集光では十分ではないため、新しい集光ミラーを作り実装。

Beam profile



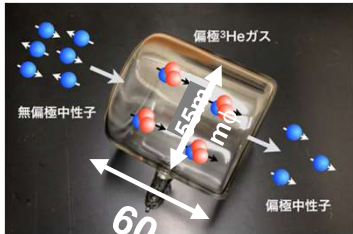
ビーム方向のみ集光する楕円型集光スーパーミラーを導入し、20倍の輝度を実現。

GISANSの実証実験へ

大強度パルス中性子を最大限に活用し、磁気構造解析、水素の働きの解明を可能とする中性子偏極法の開発と利用研究を展開している。

## <sup>3</sup>Heスピンフィルター

冷中性子から熱外中性子までより広いエネルギー範囲の中性子の高効率偏極を目指す。  
大立体角をカバーする技術開発(<sup>3</sup>Heガスセルの大型化、湾曲セルの開発)



J-PARCで作製した<sup>3</sup>Heスピンフィルター。特殊なガラスセルに<sup>3</sup>Heガスとアルカリ金属を封入した中性子偏極デバイス。

BL	装置組込	利用実験	偏極	検極
BL04		○	○	
BL05		○		○
BL06	○			○
BL10		○	○	○
BL15		○		○
BL18		△	○	
BL21		△	○	○
BL22		○	○	○
BL23	○		○	

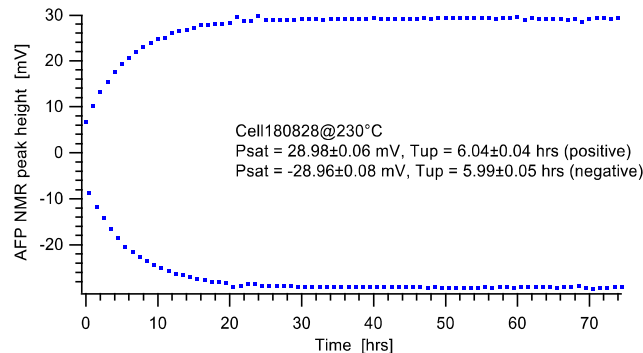
## 利用研究の展開:

- 偏極<sup>3</sup>He供給力の増強。  
現在の2-4倍へと段階的に進める。
- 多くの中性子ビームラインで<sup>3</sup>Heスピンフィルターを用いたユーザー実験の実現を目指す。

## BL23 POLANO



On Beam SEOP



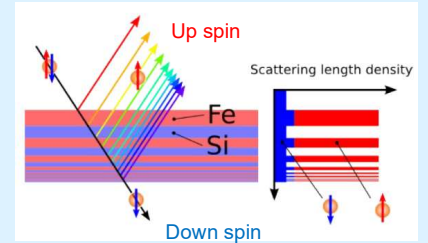
AFP スピン反転機構 (AFP-NMR) による<sup>3</sup>Heの偏極度測定。

## 偏極スーパーミラー

世界トップクラスの高臨界角、高偏極率、低磁場駆動である偏極スーパーミラーの実現。

### ・偏極スーパーミラー

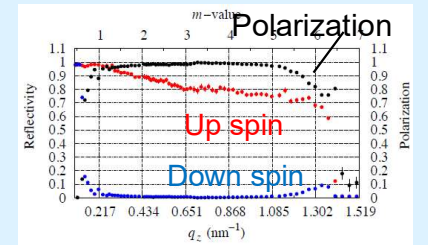
中性子スーパーミラーを磁性/非磁性層の多層膜で形成し、磁気ブラッグ反射を利用してスピン偏極を実現する光学デバイス



### Fe/Ge多層膜による偏極スーパーミラー

薄膜における磁性層間磁気結合を利用することで薄膜においても磁気オーダーを保持できることを発見

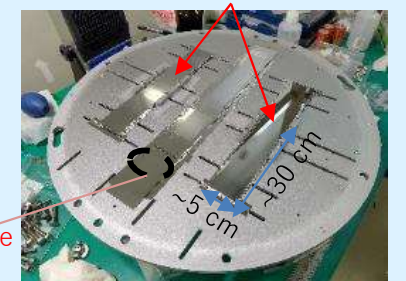
世界最高性能 (m = 6) の偏極ミラー開発に成功



### ・大面積偏極ミラーの開発

Silicon substrates (5 x 30 cm, 2 pieces)

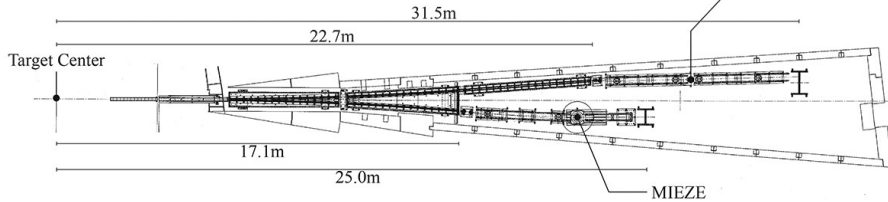
BL06Vin-Roseスピントコー装置、BL16反射率計に実装



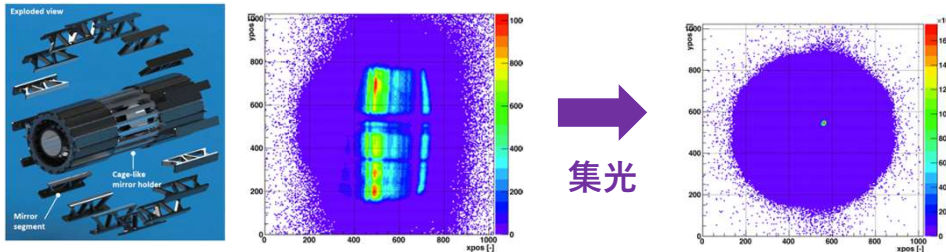
Reference piece (5.5x2.5 cm)

## BL06 VIN ROSE (Village of Neutron Resonance Spin Echo Spectrometers)

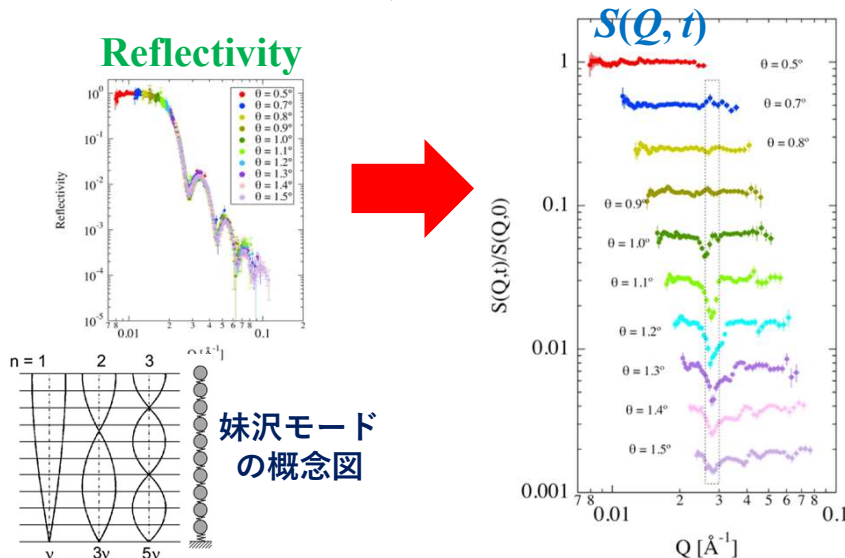
2017BよりMIEZE分光装置で共用実験開始



NRSE分光装置における回転楕円体中性子集光スーパーミラーの開発 (研究協力: 京都大学・理化学研究所)



MIEZE分光装置による薄膜垂直方向の励起モード (妹沢[Sezawa]モード) の観測



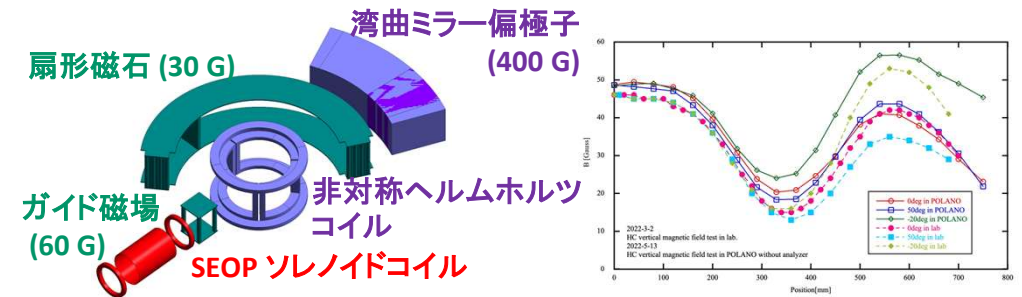
## BL23 POLANO 偏極中性子非弾性散乱法 / 複数自由度交差相関のダイナミクス研究

- 中程度運動量・エネルギー分解能を実現する直接配置型チョッパー分光器
- SEOP <sup>3</sup>He ガススピンフィルターと 5.5 Qc 湾曲ミラー偏極子の組み合わせが実現する高エネルギー領域の偏極実験

## 開始した偏極中性子非弾性散乱

偏極ビームガイド磁場:

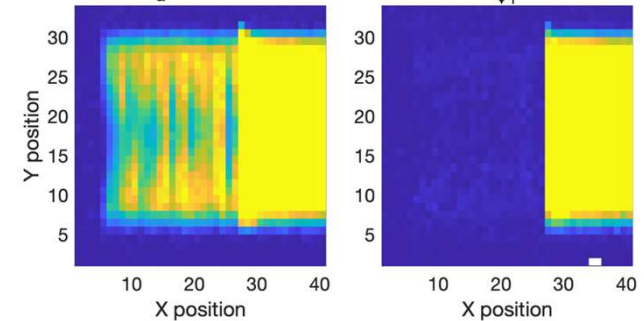
\*扇形磁石とヘルムホルツコイルの設計、試料位置から各散乱角に対する磁場分布実測と計算。



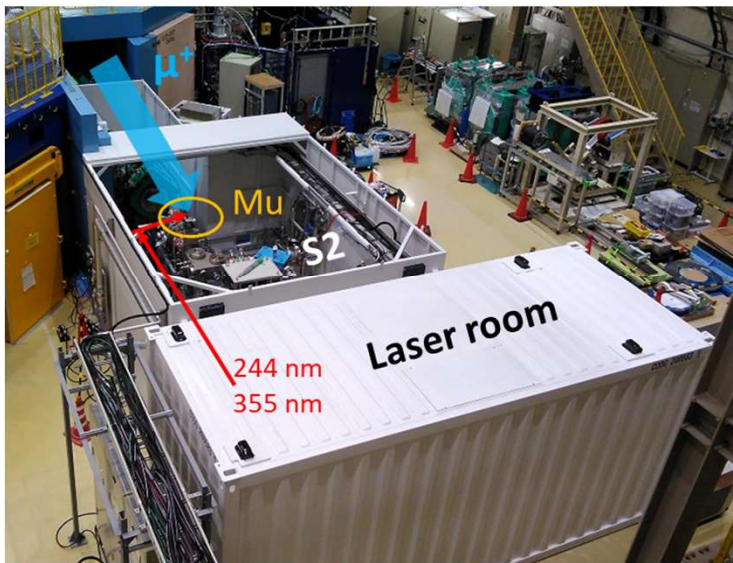
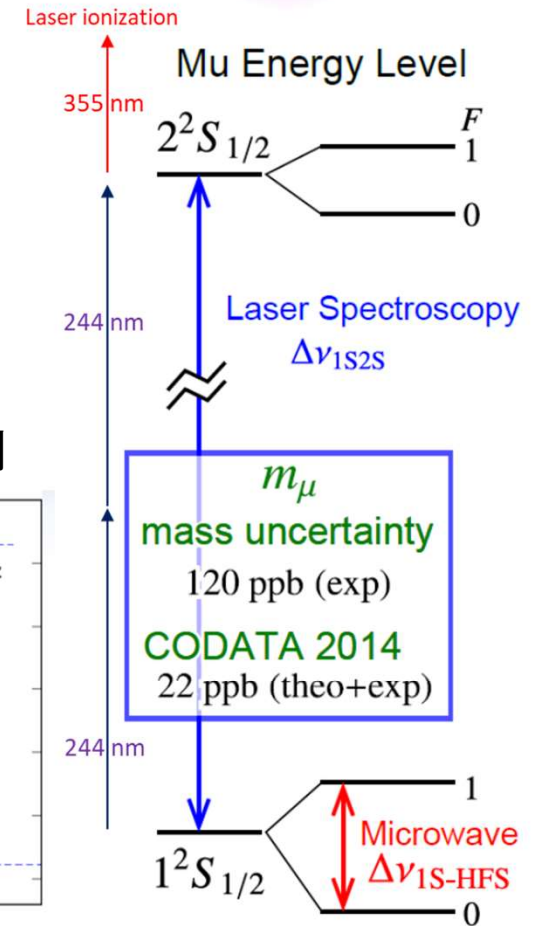
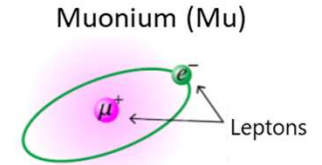
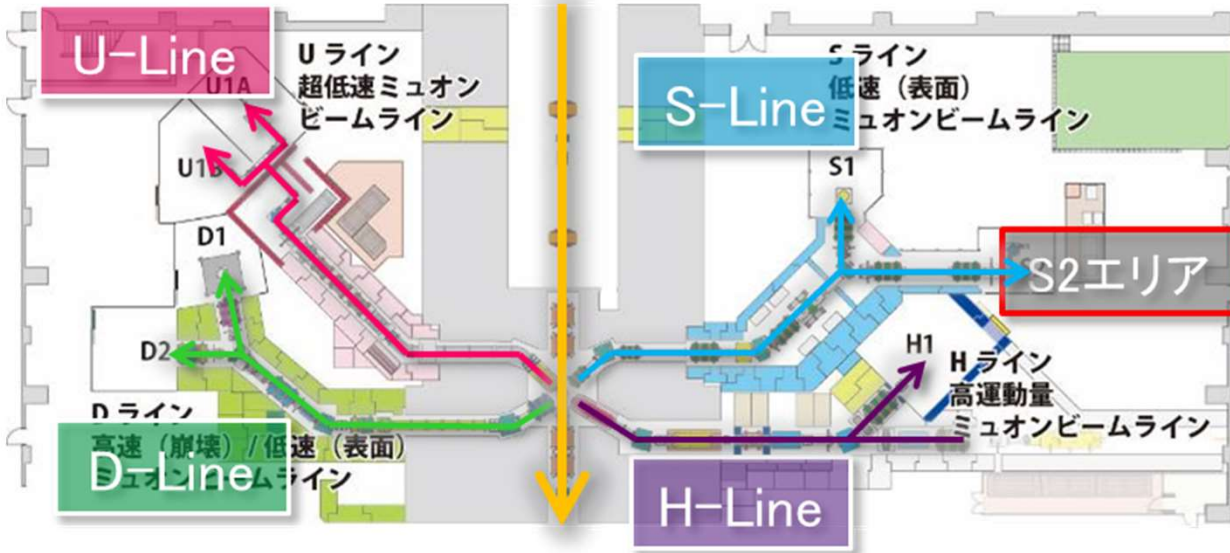
偏極度解析:

\*スーパーミラー検極子による中性子ビームによる試験開始。  
\* SEOP偏極子-ガイド磁場機器設計-スーパーミラーの3つ全てが適切に機能した

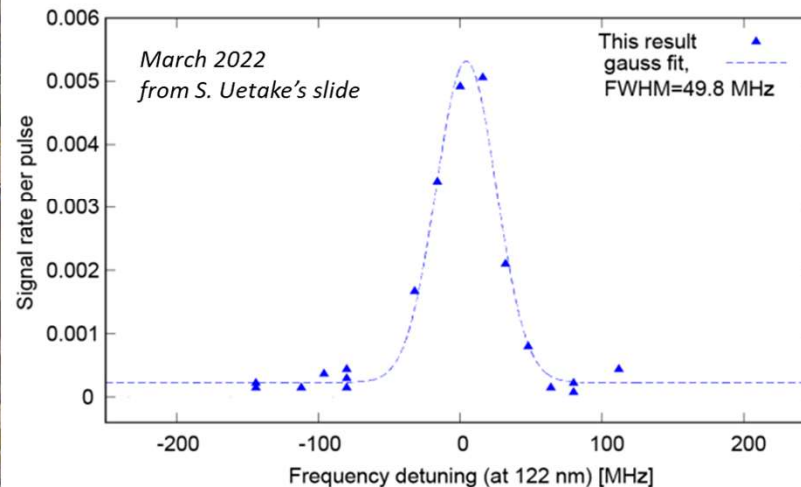
\*up-up平行スピンの反射強度→大  
\*down-up反平行スピンの反射強度→小  
 $\theta_a = 40^\circ$ : ↑ ↓



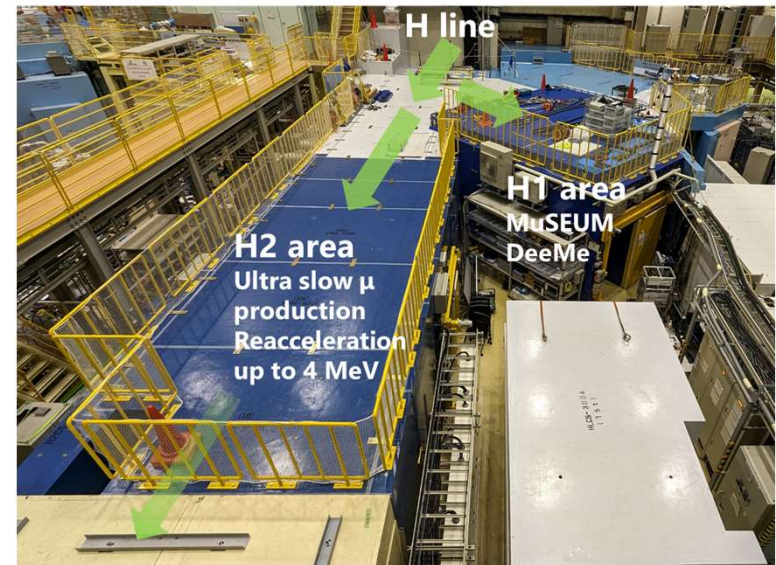
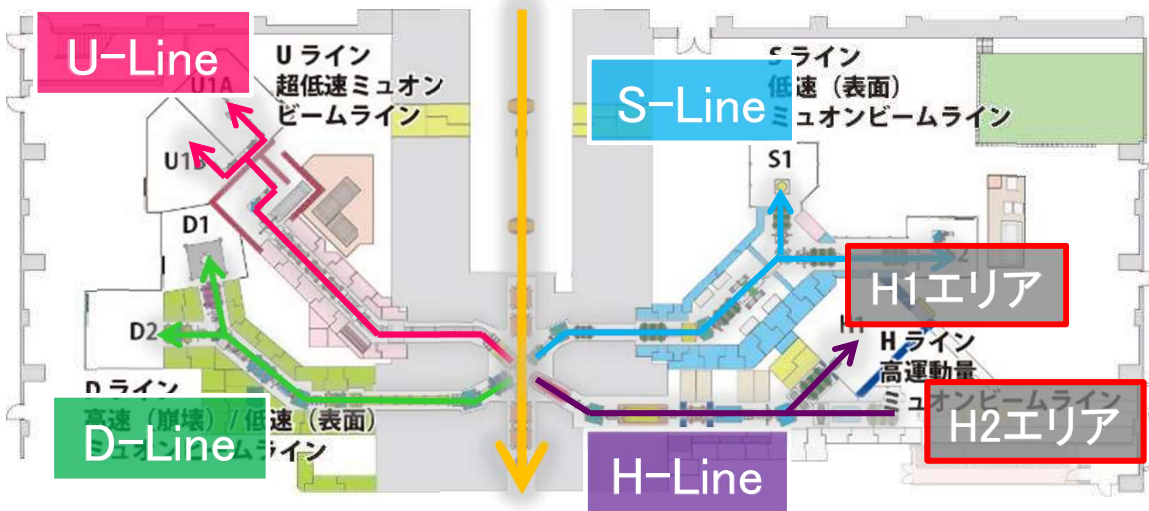
- Sライン二番目の実験エリア (S2エリア) が2021年度に稼働し、ミュオニウムの1S-2S準位の精密分光実験に用いられている。本測定によりミュオン $g-2$ に必要なミュオンの質量を精密に決定できる。



クリアな1S-2S遷移シグナルを観測

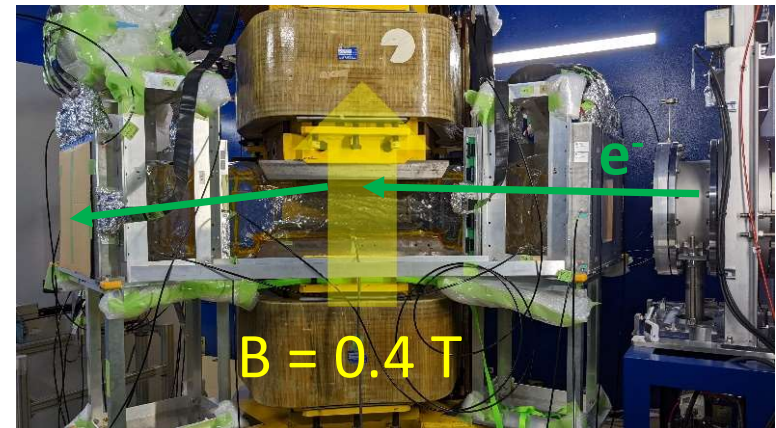
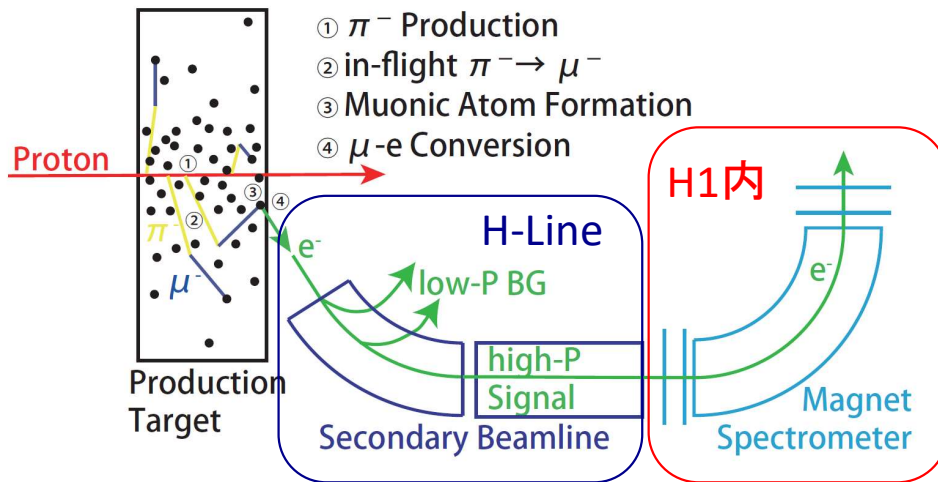


- Hライン最初の実験エリア (H1エリア) が2022年1月から稼働し、標準モデルでは禁止されているミュオン電子転換過程の探索実験 (DeeMe実験) が行われている。
- ミュオンg-2/EDMおよび透過型ミュオン顕微鏡に利用するH2エリアの整備は順調に進展しており、エリア遮蔽や安全インターロック系が2023年4月に組み上げられた。

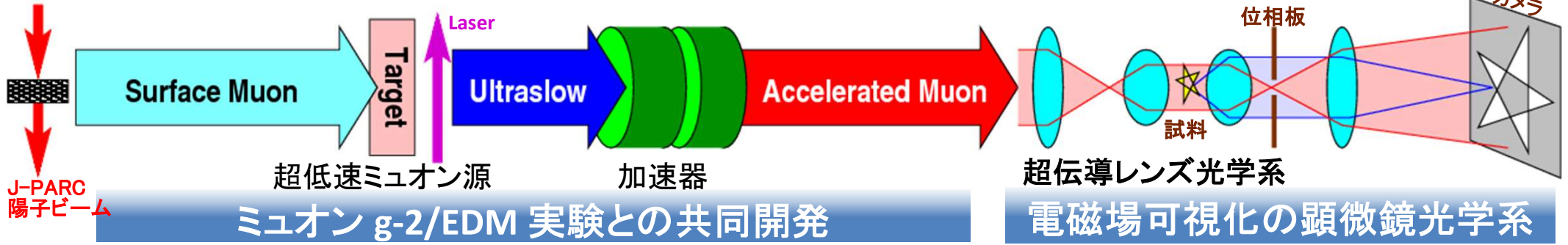


DeeMe実験磁気スペクトロメータ@H1

## ミュオン電子転換過程探索実験 (DeeMe)



= 加速ミュオン → **強い物質透過能力** + 超低速ミュオン → **高い空間分解能と電磁場分解能**  
 サブmm厚さ試料 ナノ分解能 試料内電磁場が観える



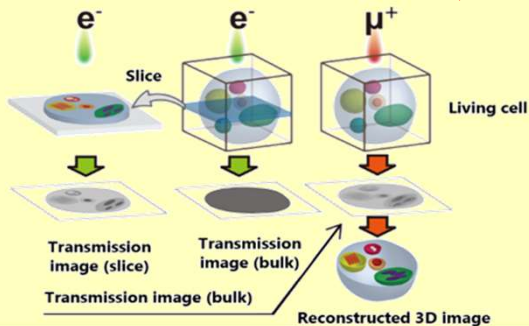
## 内部電磁場の可視化 ・パワー素子 → 産業



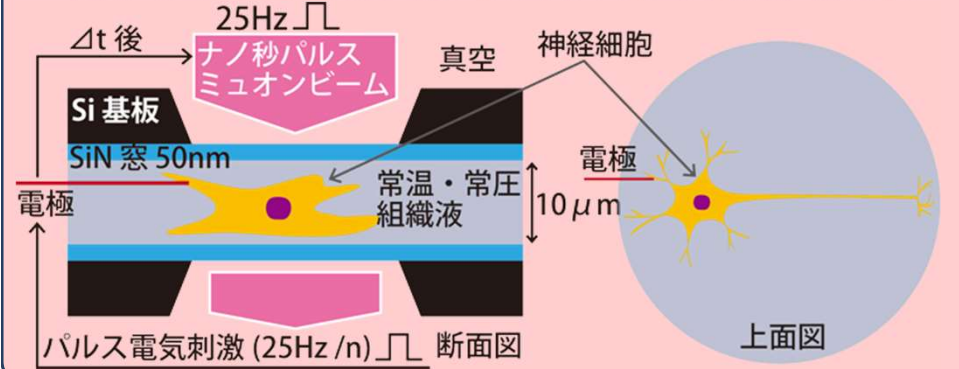
## ・脳神経/ソフトマター



## ・生きた細胞を丸ごと観察

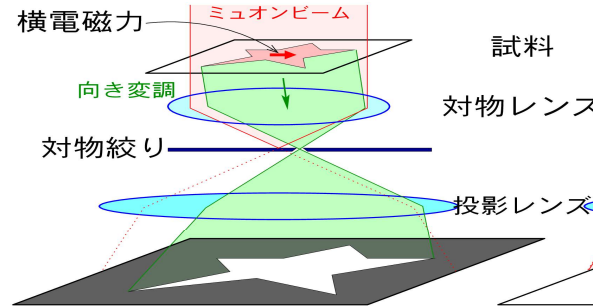


## 神経組織を生きたまま神経電位を動画観察

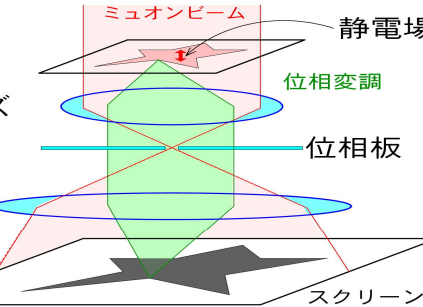


荷電粒子のミュオンはサブmm厚試料内部の電場と磁場の両方を高分解能で可視化

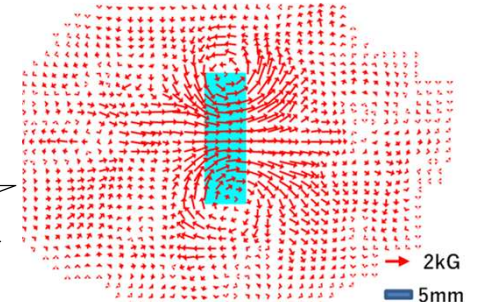
## ローレンツ顕微鏡法



## ゼルニケ位相差法



磁場可視化の原理は実証済



大面積(30μm)<sup>2</sup> の3K画像を 10nm 分解能 (2.4時間露出)  
 大容積(30μm)<sup>3</sup> の3次元CTを 30 nm 分解能 (1日露出)

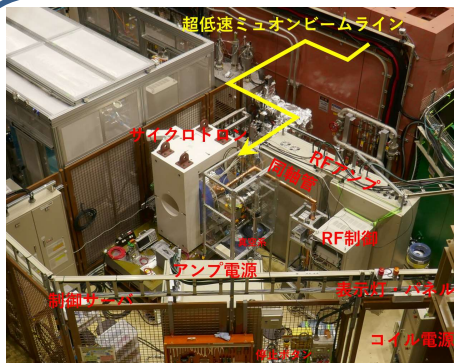
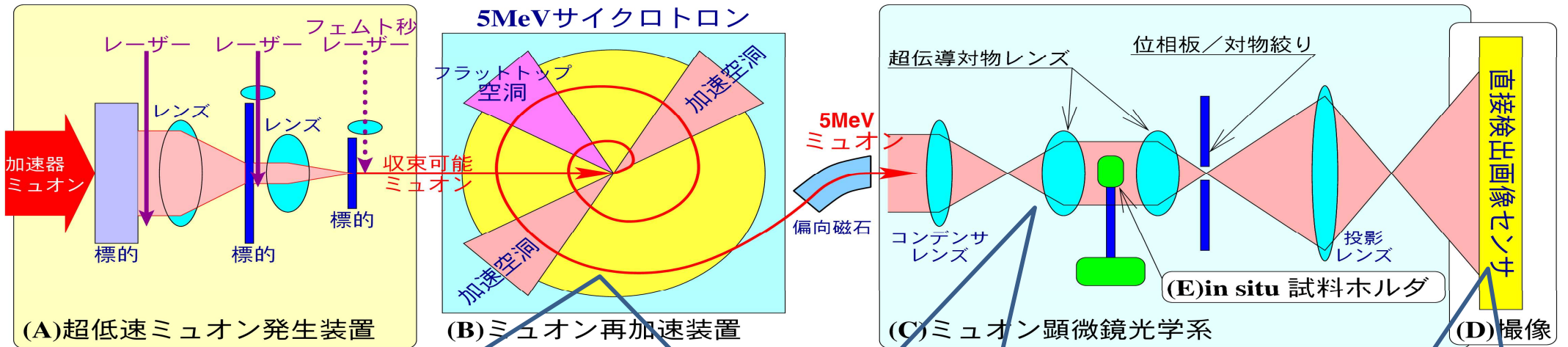
大気中の永久磁石の磁場の可視化実験の結果

スケジュール	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
加速器	サイクロ加速試験							
<b>Uライン</b> における <b>原理実証機</b>	超伝導光学/ローレンツ光学		位相差光学					
レンズ光学系								
ビーム冷却装置	2 段目開発		3 段目開発	4 段目開発				
観察実験				パワー素子の観察 凍結細胞		生きた細胞		
<b>Hライン</b> <b>実機建設</b>	muon g-2/EDM 計画		建屋完成★	加速器完成★	★試験・★実験開始		★First Result of muon g-2	
顕微鏡建設			超伝導鏡筒開発・設置			★低倍観察	多段冷却開発・設置	★高倍観察★供用開始

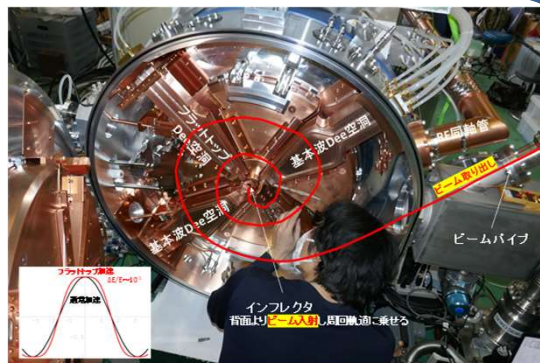
Uライン性能：大面積(130 $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup>の1K画像を **200nm 分解能** (1日露出)

Hライン性能：大面積(30 $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup>の3K画像を **10nm 分解能** (2.4時間露出)  
大容積(30 $\mu\text{m}$ )<sup>3</sup>の3次元CTを **30 nm 分解能** (1日露出)

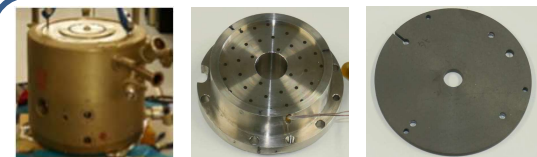
どちらも**電位感度**  
25mV/ $\mu\text{m}$



U-Lineに設置、BL接続済。



次期BTで加速試験開始。



JEOLよりKEKに無償技術供与

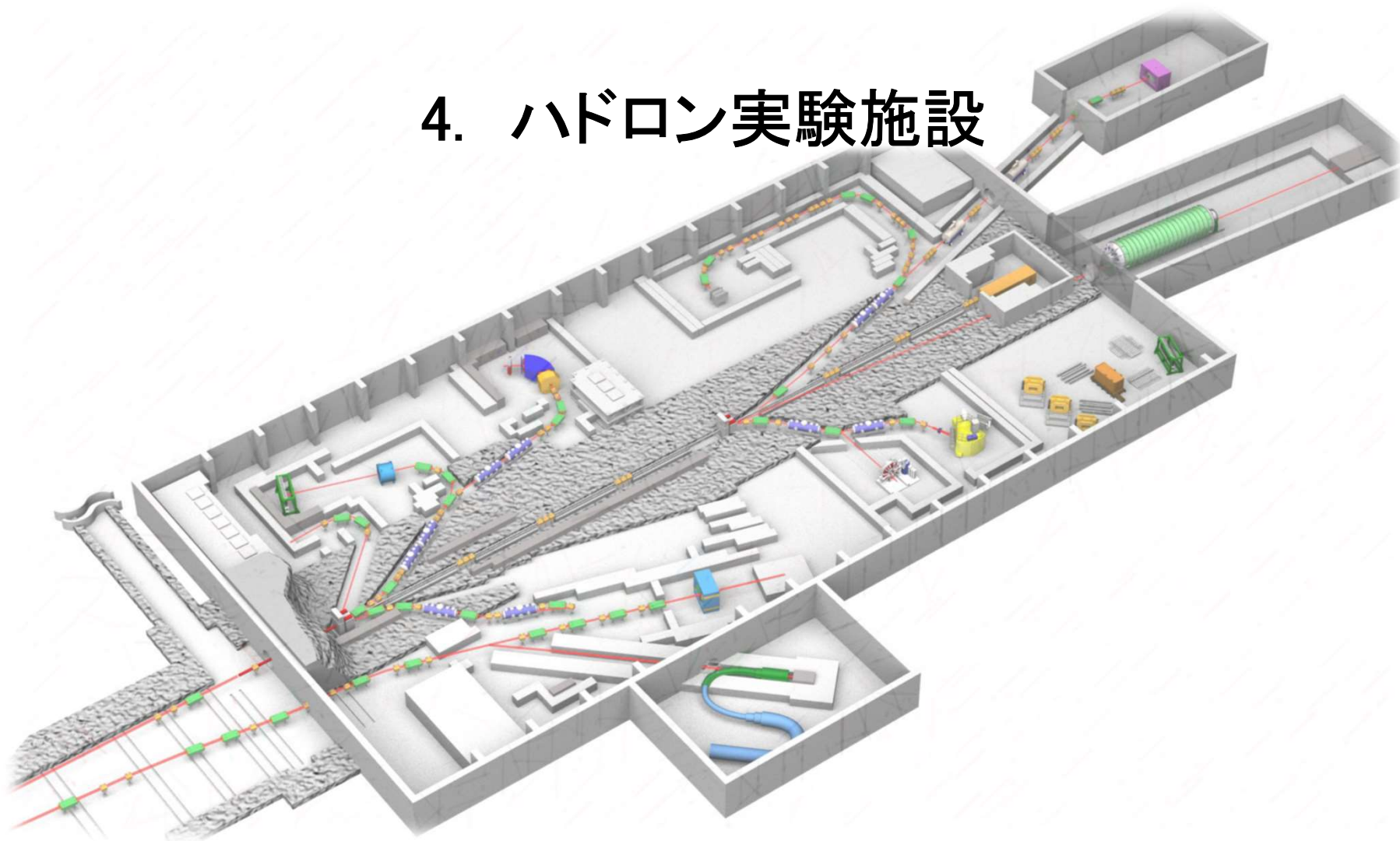


CMOS画像センサ  
デジカメ用  
画像センサで動作検証済

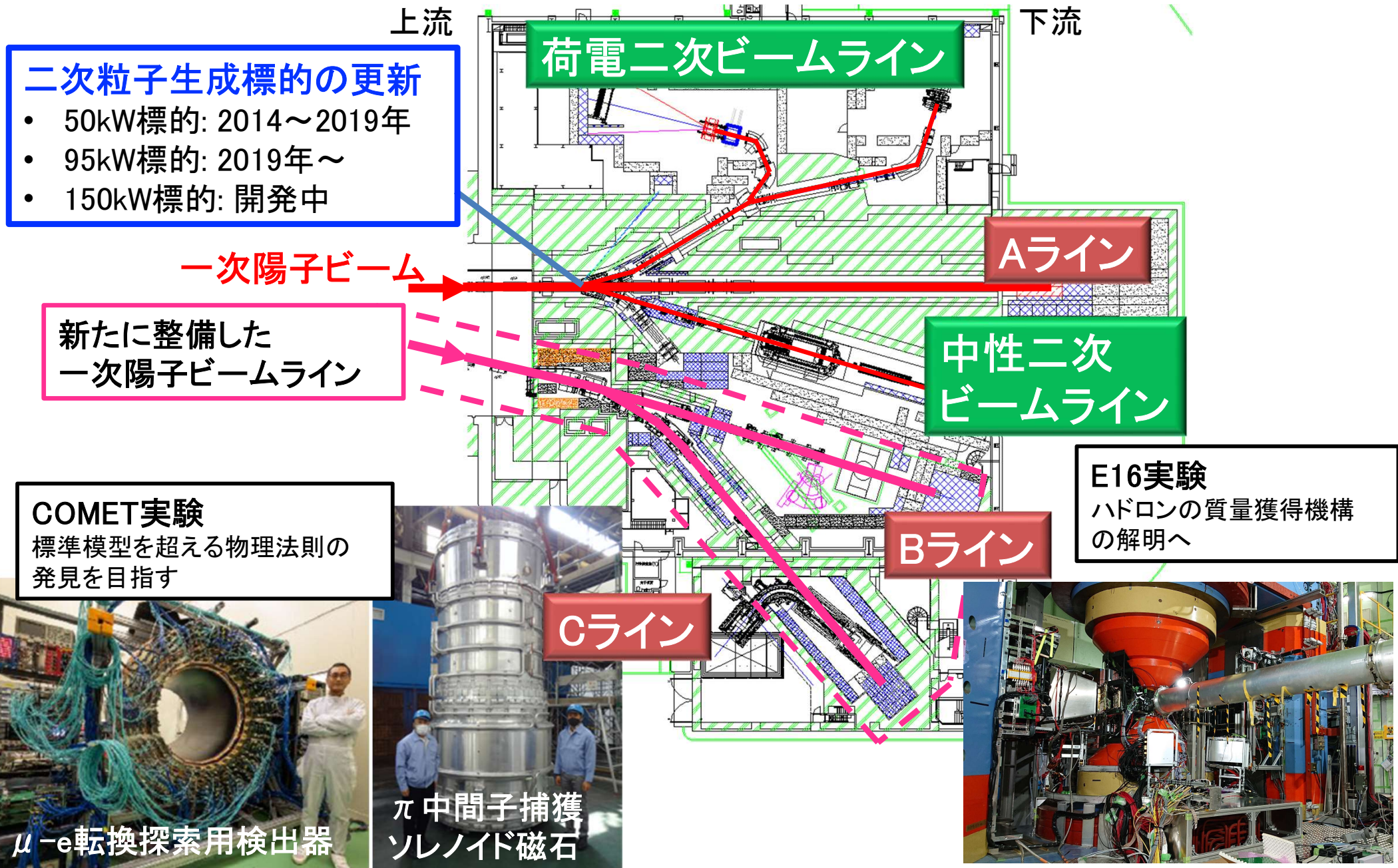
**KEK構造生物(千田)・生理研(村田)・藤田医大(白田)と連携：**  
位相差TEMとT $\mu\text{M}$ の両方で観察可能なミトコンドリアの膜電位測定で、電顕とミュオン顕微鏡の連続性を証明し、厚い神経細胞・組織の活動電位の観察へと移行。クライオ観察から生観察へと移行。

## 施設の整備・運用／将来に向けた高度化

### 4. ハドロン実験施設







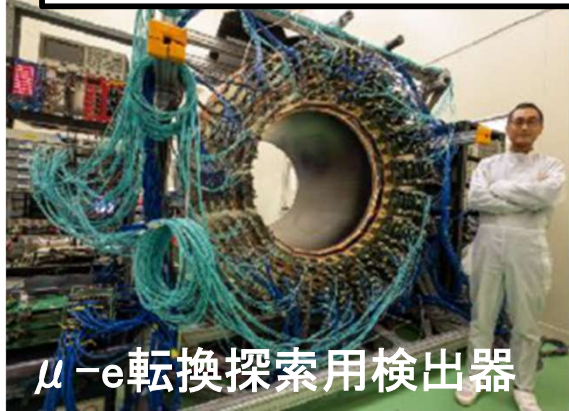
## 二次粒子生成標的の更新

- 50kW標的: 2014～2019年
- 95kW標的: 2019年～
- 150kW標的: 開発中

新たに整備した  
一次陽子ビームライン

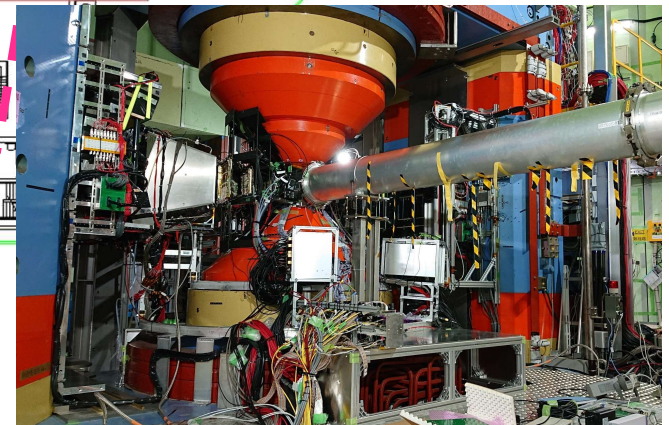
## COMET実験

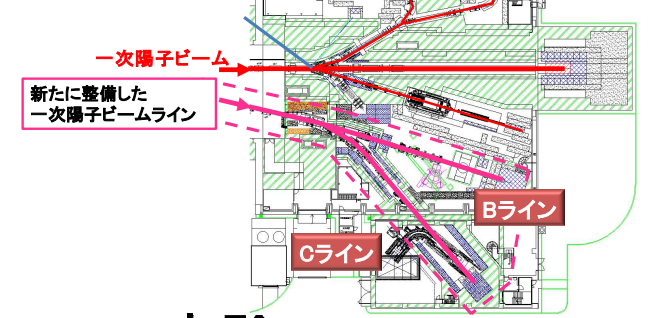
標準模型を超える物理法則の  
発見を目指す



## E16実験

ハドロンの質量獲得機構  
の解明へ





## BラインでのE16実験

- 日本で一番高いエネルギーの陽子ビーム (30GeV)を直接用いる実験。
- 原子核内に「 $\phi$  (ファイ) 中間子」を生成しその質量が周りの環境で変化するのかを  $\phi$  中間子の崩壊により測定する。
- 2020年に運転を開始。



## CラインでのCOMET実験

- ミューオンがニュートリノを伴わずに電子へ転換する「 $\mu \rightarrow e$  転換事象」を世界最高感度で探索する。
- J-PARCの大強度・高品質陽子ビームによりバンチ構造を持った陽子ビームを取り出す。
  - ビームパルス間への漏れ出しが $10^{-10}$ 以下
- 2022年専用ビームラインが完成し、2023年2月-3月に最初のビーム供給を実施。



# ハドロン実験施設: 将来に向けた高度化

学術意義：  
宇宙と物質の起源と進化に関する包括的な研究



既存施設の高度化により  
様々なビームラインを設置して  
世界最高の分解能、統計精度、感度を目指す。



例：

分解能 **数100 keV**

超高分解能  
 $\Lambda$ ハイパー核分光

核物質中でのストレンジ核子の核力の解明

統計精度 **10倍**

偏極  $\Lambda p$  散乱

真空でのストレンジ核子の核力の詳細解明

分解能 **3 MeV**

系統的な  $(K^-, K^+)$  分光測定

ダブルストレンジ原子核の構造研究

核内ベクター中間子 **数10倍の事象**

核内ベクトル中間子高感度測定

ハドロン質量獲得機構の解明

チャームバリオン励起状態の測定

機能強化(20 GeV/c **2次ビーム**)

KOTO step2

中性K中間子稀崩壊

クォーク相関の発見と性質の解明

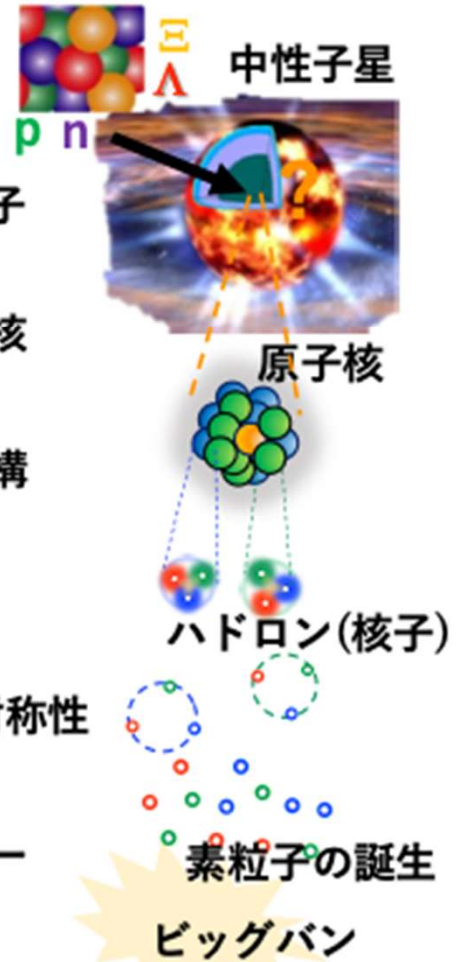
標準模型  $3 \times 10^{-11}$  を超える  
世界最高感度

標準模型を超えるCP対称性の破れの探索

$\mu \rightarrow e$  転換測定

荷電レプトンフレーバーの破れを高感度で検証

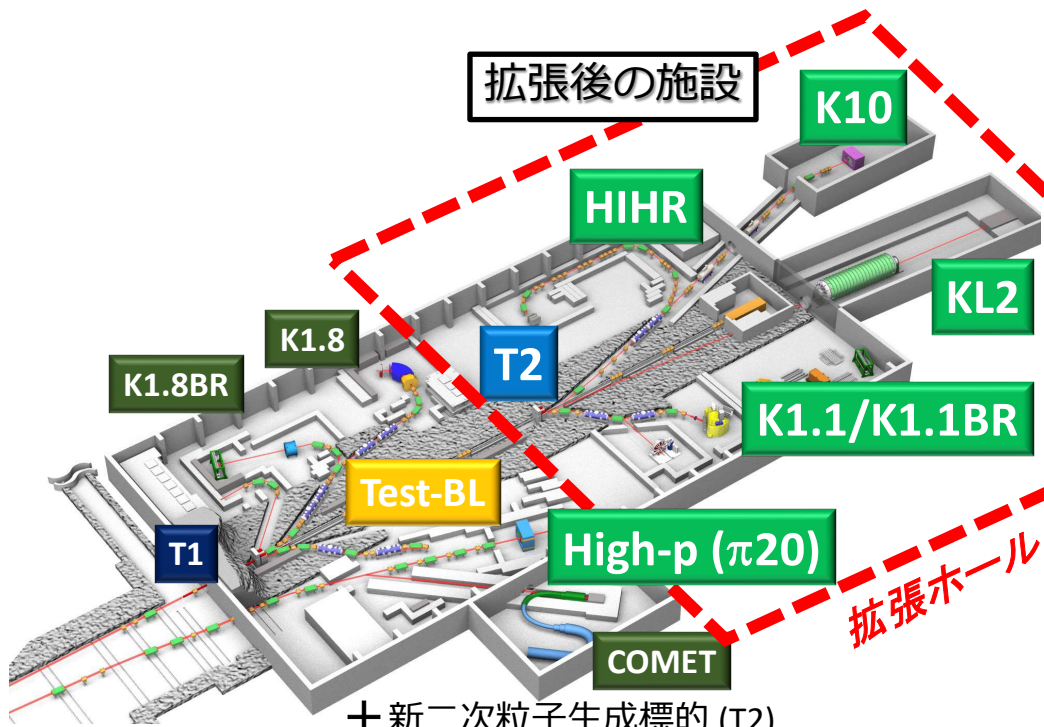
過去の上限値の**100倍以上**の向上



# ハドロン実験施設: 将来に向けた高度化

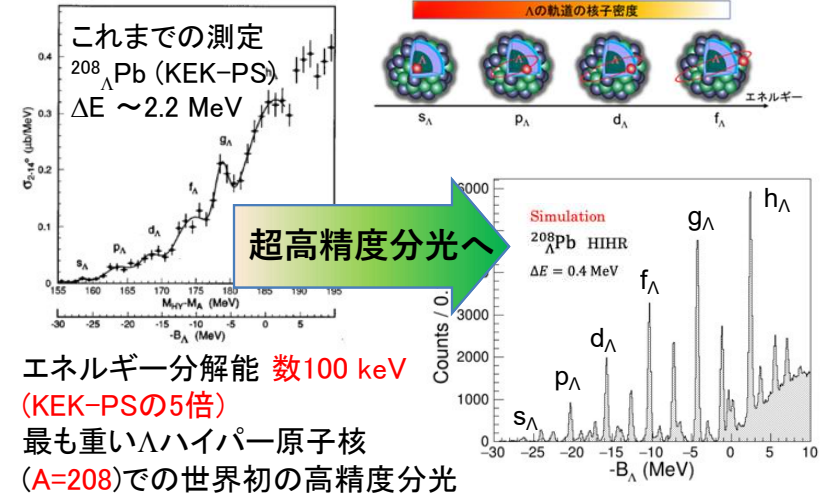
- KEKの実施計画 (Project Implementation Plan、2022年6月) でハドロン実験施設の拡張が「優先度に従って新たに予算要求するプロジェクト」の優先順位1位に取り上げられた。

施設を拡張することにより  
新たな研究を展開し、  
物質の起源と進化を解明する

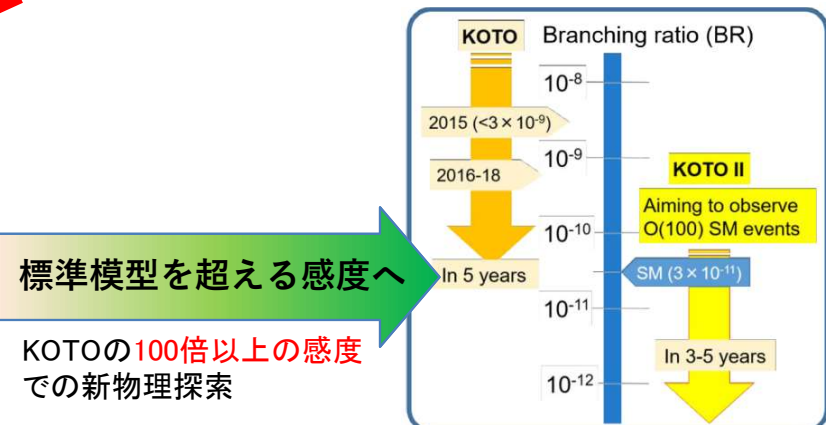


- + 新二次粒子生成標的 (T2)
- + 新ビームライン (HIHR, K1.1/K1.1BR, KL2, K10)
- + 機能を向上させたビームライン (High-p (π20), Test-BL)

## 核物質中でのストレンジ核子の核力の解明 最も重いラムダハイパー核の初の高分解能分光



## 標準模型を超えるCP対称性の破れの探索 CP対称性を直接破る $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊 新物理探索に最適なプローブの1つ



## 施設の整備・運用／将来に向けた高度化

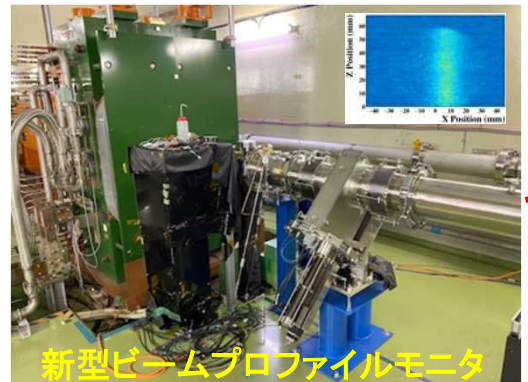


ビームパワー750 kW → 1.3 MWを  
目指した大強度対応

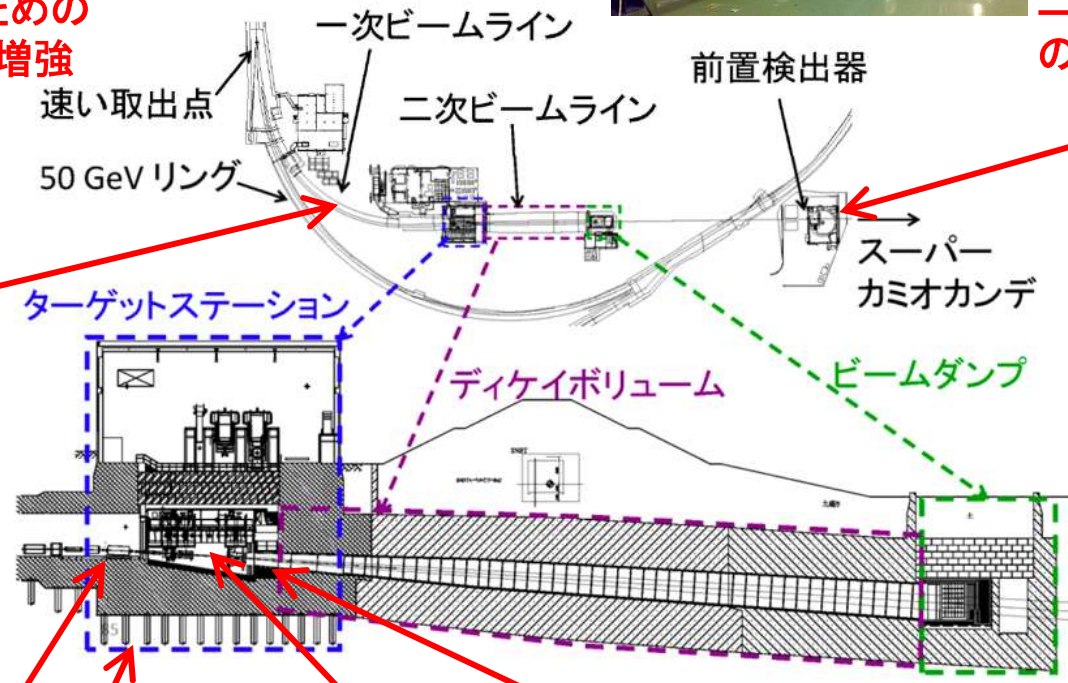


超伝導電磁石による  
一次ビームライン  
-消費電力が2割に

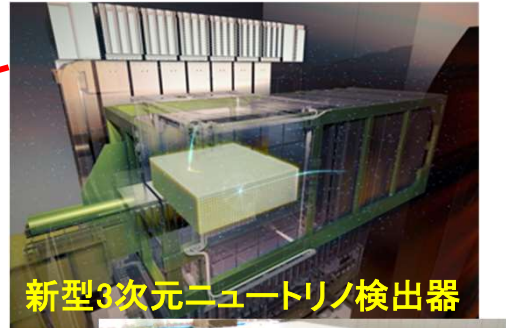
大強度ビームの安定生成のための  
陽子ビームモニタ・制御系の増強



新型ビームプロファイルモニタ  
放射化する機器のリモート  
メンテナンス性向上改修



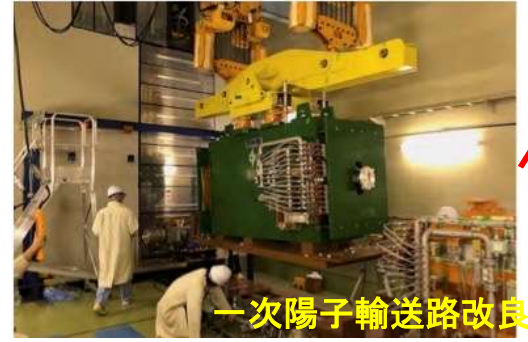
ニュートリノ反応測定精度向上  
のための前置検出器増強



新型3次元ニュートリノ検出器



放射線遮蔽強化  
放射化冷却水処理強化



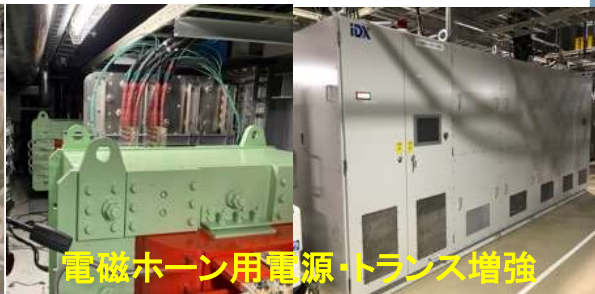
一次陽子輸送路改良

ニュートリノ生成装置群  
の冷却能力増強

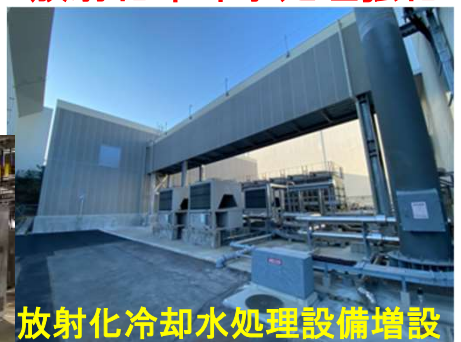
ニュートリノ収率向上のための  
電磁ホーン電流増強



大強度対応標的・  
電磁ホーン



電磁ホーン用電源・トランス増強



放射化冷却水処理設備増設

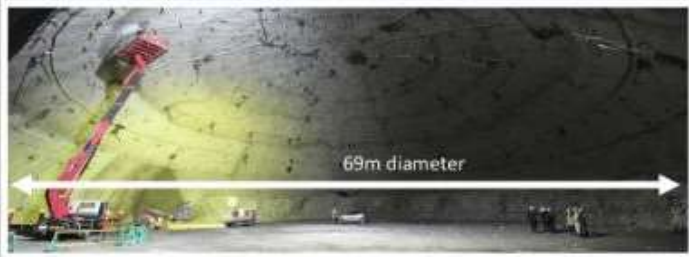


二次ビームライン機器

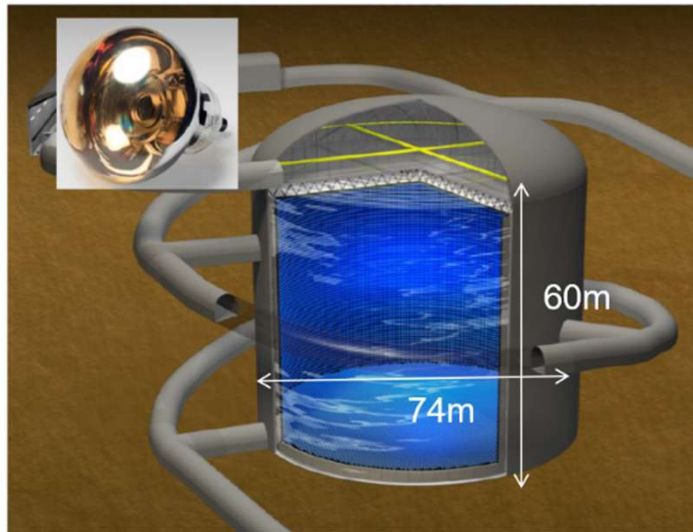


遠隔メンテナンス改良

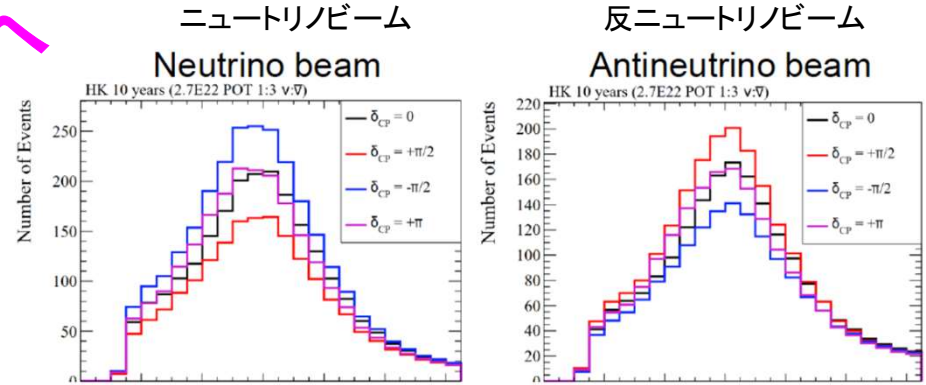
## 宇宙の物質起源のなぞ解明へ



アクセストンネル・ドーム部掘削完了



光電子増倍管の製造進行中



2つのニュートリノ振動に違い(=CP対称性の破れ)があるか？を検証して、**宇宙が誕生したときに生成されたはずの反粒子がなぜ現在は自然界で観測されないのか？**という謎にせまる。  
← CP対称性の破れが最大(T2K実験で示唆)の場合、実験開始から数年で「 $5\sigma$ での発見」の可能性。

### ハイパーカミオカンデプロジェクト

- KEK
  - **ビーム大強度化 (1.3MW)**
  - **前置検出器の増強**
- 東京大学宇宙線研
  - ハイパーカミオカンデ検出器施設
    - 190kt = 現行実験(SK)の約8倍
- 国際コラボレーション: 22カ国~600名
- 2027年運転開始を目指して建設中
  - 2023.10 トップドーム掘削完了



# 将来に向けた高度化: ミュオンg-2/EDM実験

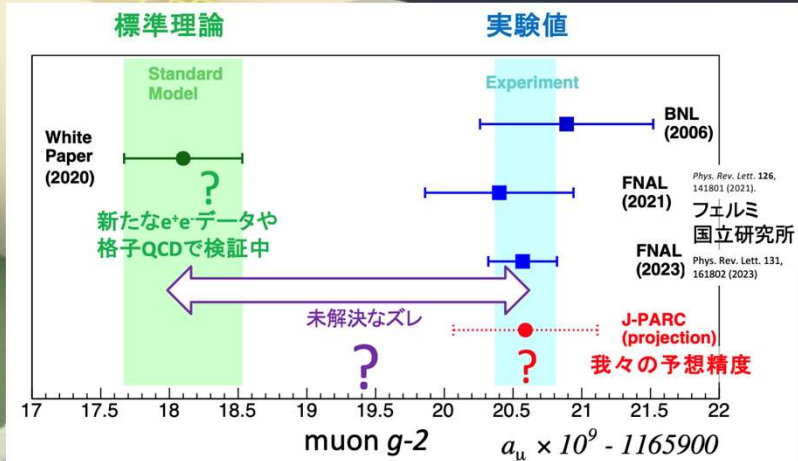


冷却・加速による新しいミュオンビームにより

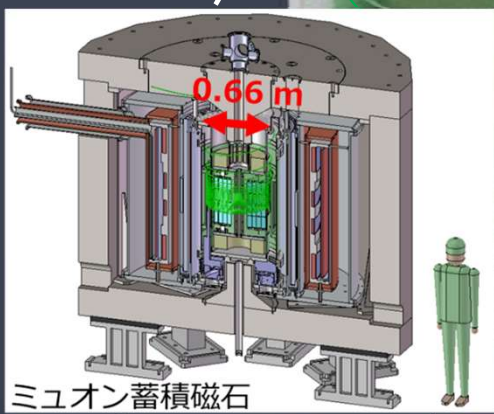
- ・ コンパクトな蓄積磁石・検出器(1/20)
- ・ 微弱ビーム収束力で蓄積(1/1000)
- ・ 高いビーム入射効率(x10)

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

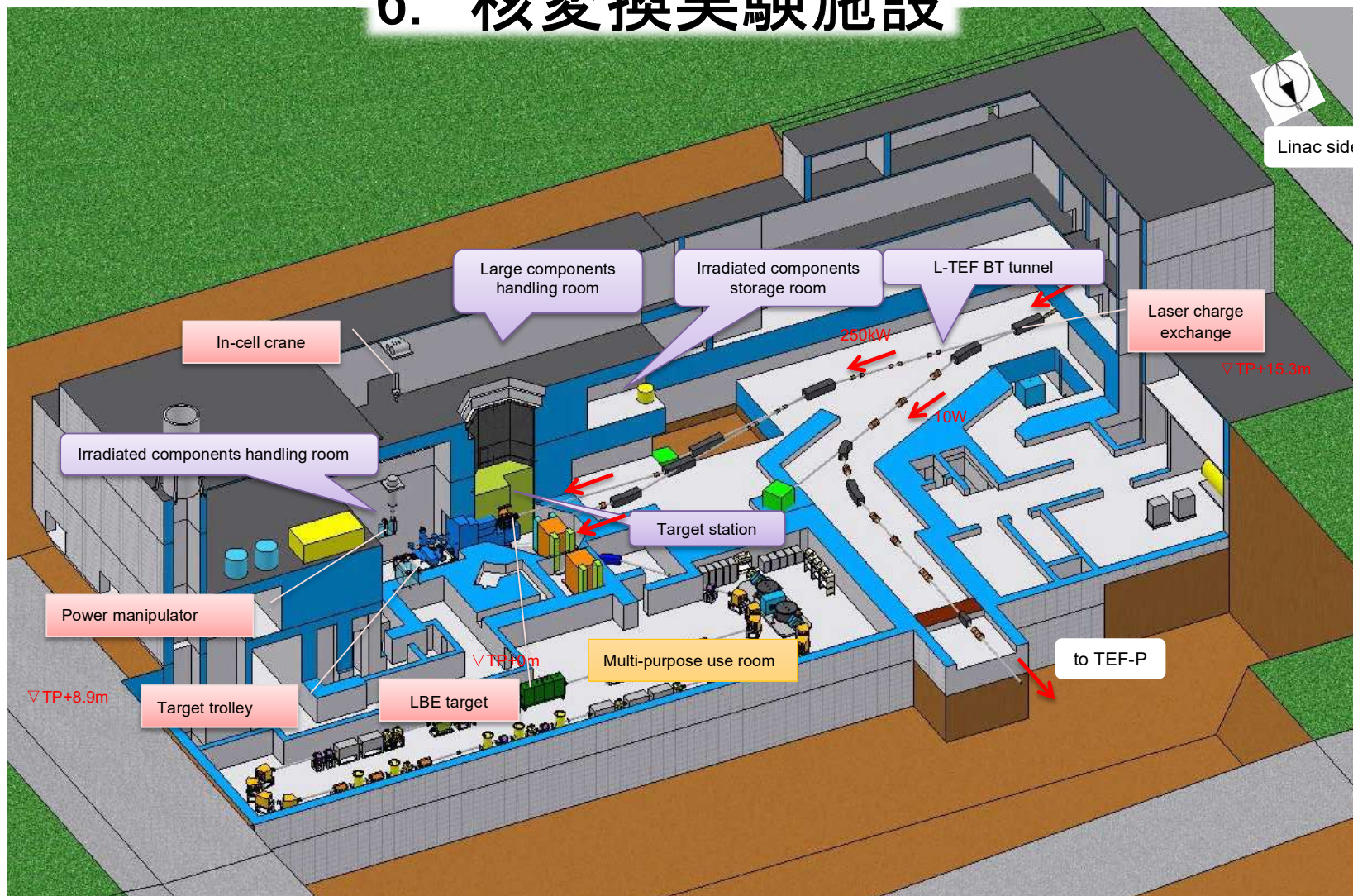


ミュオン蓄積磁石  
ミュオンg-2とEDMを同時に精密測定



# 施設の整備・運用／将来に向けた高度化

## 6. 核変換実験施設

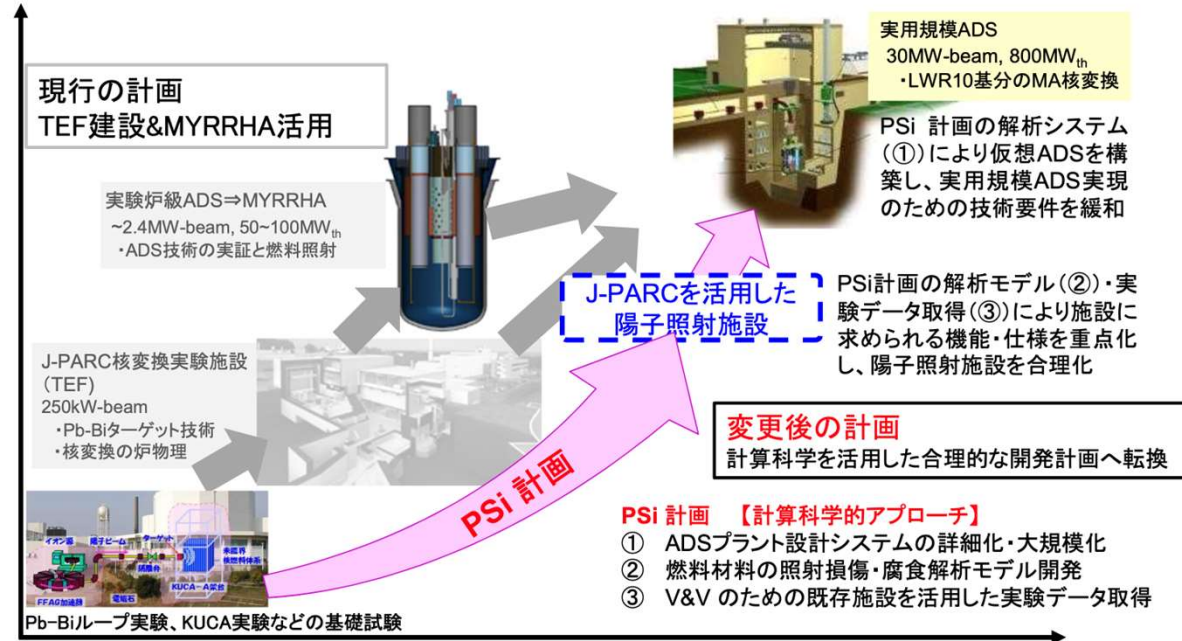


- J-ARCセンターと原子力基礎工学研究センターが協力し、より合理的かつ効率的な進め方（PSi計画）についての検討を実施。
- その結果を令和3年に開催された PT-TF\*で報告、「原子力機構が提案している PSi計画を進めることは妥当である。」との評価を得た。

\*PT-TF: 文科省 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会 群分離・核変換技術評価タスクフォース(令和3年に開催)  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/106/gji\\_list/index.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/106/gji_list/index.htm)

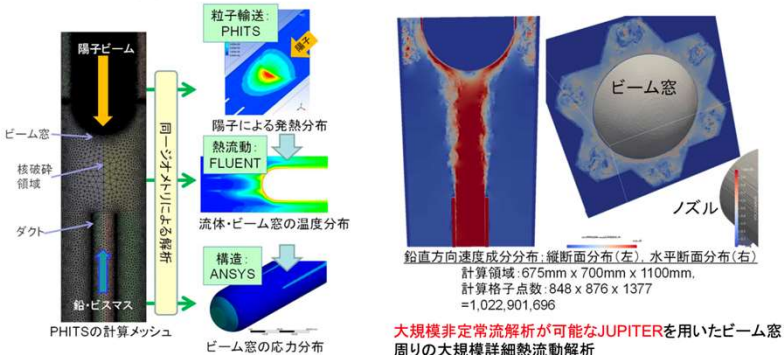
PT-TF資料より

## ADS研究計画 見直しの概要



## 計算科学活用例: 核・熱・構造連成解析システムの開発

ADS特有の核破砕ターゲット・ビーム窓領域を対象に、ADS安全性評価において重要なビーム窓の構造健全性を評価するために、粒子輸送、熱流動、構造解析を連成させたシミュレーションシステムの高度化を目指す。



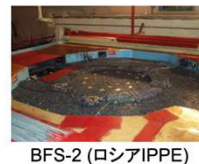
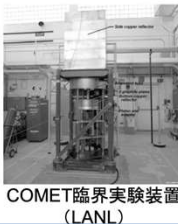
- ・ 粒子輸送・熱流動・構造連成解析システムの開発に着手。
- ・ 今後、非定常解析を含む解析システムの高度化を実施するとともに、炉内システム全体の拡張を目指す。

## ADSに係る国際協力

国際協力を最大限に活用し、実験データ取得や情報交換を行うことにより、効率的に研究開発を推進。

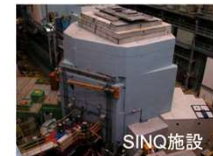
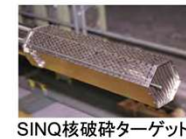
### 炉物理分野

- 米国LANLとの共同研究: COMET臨界実験装置を用いて鉛の積分実験データを取得。
- ロシアとの情報交換: 臨界実験装置(BFS-1, -2)で取得された実験データとの交換を予定
- IAEA共同研究: JAEA設計ADSの燃焼解析ベンチマークを実施し、MA核データ起因の不確かさを検討。



### 材料照射・鉛ビスマス分野

- スイス・ポールシェラー研究所(PSI)との研究協力: 核破砕ターゲット照射プログラム(STIP-8)に参加。計49週間の照射を終了し(2018-2020年)、標的から試験片取出し後(2022年予定)、照射後試験を実施する予定。
- ベルギー原子力研究センター(SCK CEN)との研究協力: 核工学、LBE技術、加速器技術等について研究協力を実施。2021年11月に研究協力取決延長予定。
- ドイツ・カールスルーエ工科大学(KIT)との研究協力: 研究協力取決を締結(2020年6月)し、鉛ビスマス技術分野の協力を実施。



- 核変換実験施設(TEF-P および TEF-T)について、施設の基本設計を終え、2017年度にそれぞれの設計書を刊行。
- J-PARC核変換実験施設テクニカルアドバイザリー委員会(2019年)
  - 「良くまとめられたTEF-T技術設計書が準備され、またTEF-Tの概念設計が完結するとともに基本設計が順調に進捗したと考える。」

**核変換物理実験施設:TEF-P**

目的: 低出力で未臨界炉心の物理的特性探索とADSの運転制御経験を蓄積

施設区分: 原子炉(臨界実験装置)

陽子ビーム: 400MeV-10W

熱出力: 500W以下

**ADSターゲット試験施設:TEF-T**

目的: 大強度陽子ビームでの核破砕ターゲットの技術開発及び材料の研究開発

施設区分: 放射線発生装置

陽子ビーム: 400MeV-250kW

ターゲット: 鉛・ビスマス合金

安全設計書完成(JAEA-Technology 2017-033, 2018/2, 383 pages)、原子炉の設置許可申請の一手手前まで到達

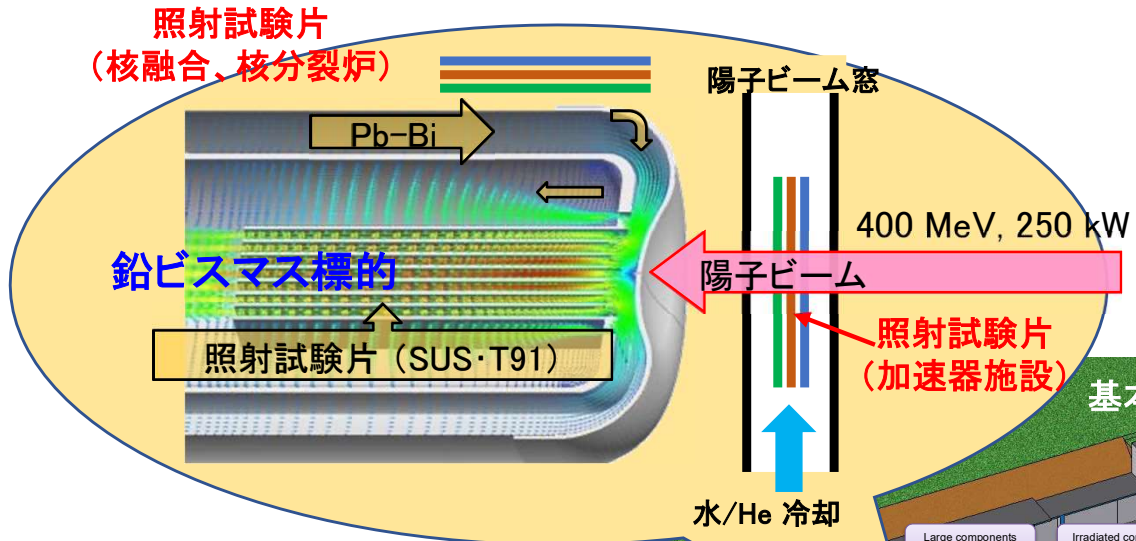
技術設計書完成(JAEA-Technology 2017-003, 2017/3, 539 pages)、建設着手準備完了



■ PT-TF報告書「群分離・核変換技術評価について」(R3.12)

II. 群分離・核変換技術の研究開発の今後の進め方    3. J-PARC核変換実験施設の在り方

- TEF-Tで予定していた陽子照射下、かつ高温Pb-Bi流動環境下におけるビーム窓材料の実証試験は、照射損傷シミュレーションと既存施設での照射試験だけでは代替困難である可能性が高く、上記の取り組みによる実験項目の絞り込みや施設の合理化を検討する必要がある。
- 使用を想定していた原子力機構保有の核燃料の一部(高濃縮ウラン、プルトニウム)が米国へ移送されたため、TEF-Pで実施予定であった炉物理研究項目が大幅に制限される。
- TEF-Tの機能を優先した試験施設として検討することが妥当である。
- ADSの工学的課題解決に加え、多様なニーズへの対応の可能性を含め、既存のJ-PARCの陽子加速器を利用可能な利点を最大限活用する施設仕様を検討することが望ましい。



ベースライン設計:  
ADSターゲット試験施設  
(JAEA-Technology 2017-003, 539 pages)

4つの応用分野(1~4.)を特定

Linac のH<sup>-</sup> ビーム  
400 MeV, 250 kW,  
625 μA, 500 μs, 25 Hz

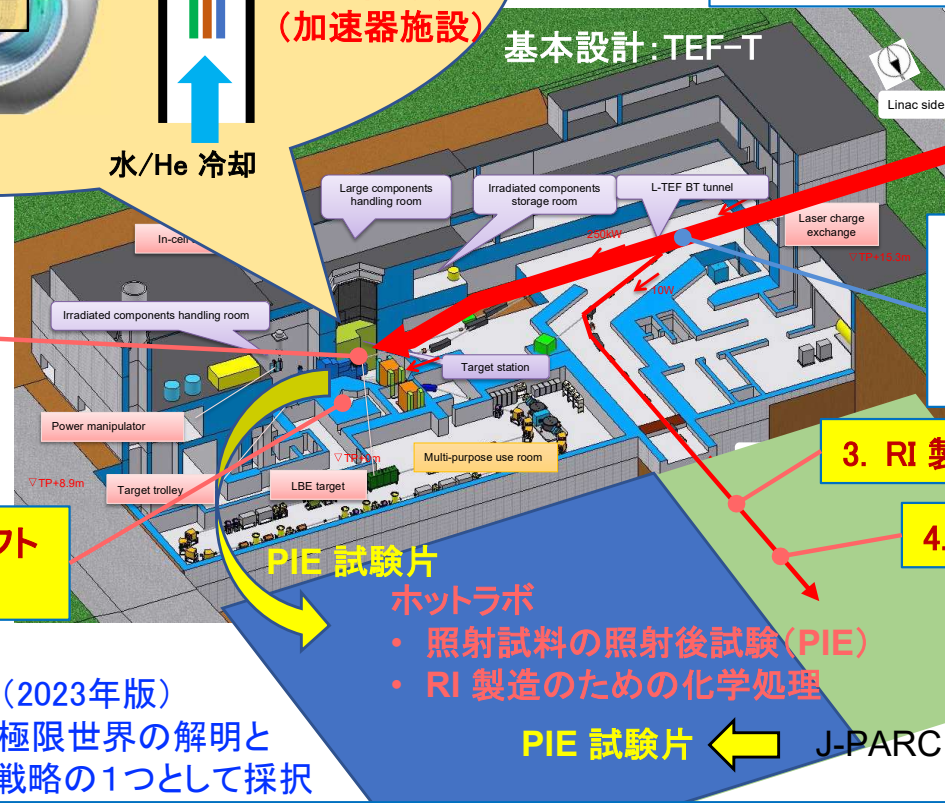
- 一部の陽子ビームを切り分け
- 強度、パルス幅等を柔軟に変更可

1. 材料照射
- 高エネルギー加速器施設 (ADS含む)
  - 核融合、核分裂炉

2. 半導体素子のソフトエラー試験

3. RI 製造

4. 陽子ビーム利用



ホットラボ  
• 照射試料の照射後試験 (PIE)  
• RI 製造のための化学処理

PIE 試験片 ← J-PARC 既存実験施設

日本学術会議 未来の学術振興構想(2023年版)  
グランドビジョン「量子ビームを用いた極限世界の解明と人類社会への貢献」の学術の中長期戦略の1つとして採択

- R4.7.28 研究会『J-PARC陽子ビーム照射施設計画とユーザーコミュニティ設立』開催  
R5.7.29 『J-PARC陽子照射施設検討に関する研究会』開催
- ユーザーコミュニティ活動として、各応用分野からの施設へのニーズが取り纏められた(R5.4.11)。
  - 各応用分野から、実験施設計画への強い関心が示された。

