

物質生命科学実験施設 ミュオン科学実験施設(MUSE)の現状と将来

門野良典



ミュオンとは

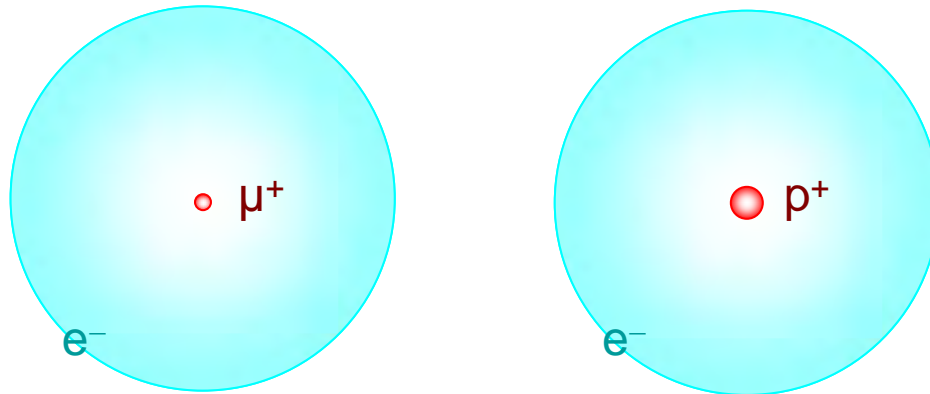
物質中のミュオン

・正ミュオン (μ^+) : 陽子 / 水素原子の軽いアイソトープ

| Atom | ミュオニウム | 水素原子 (H) |
|----------------|----------|----------|
| 換算質量 (m_e) | 0.995187 | 0.999456 |
| ボーア半径 (Å) | 0.531736 | 0.529465 |
| 基底状態 (eV) | -13.5403 | -13.5984 |

電子状態の違いはわずかに ~ 0.4%

ミュオンは微量水素の状態をシミュレート！



・負ミュオン (μ^-) : 重い電子、原子核の電荷をeだけ遮蔽

ミュオン
Muon



重さ: 陽子の9分の1
(電子の200倍)

電荷: +e, -e

スピン: 2分の1

スピンとは？

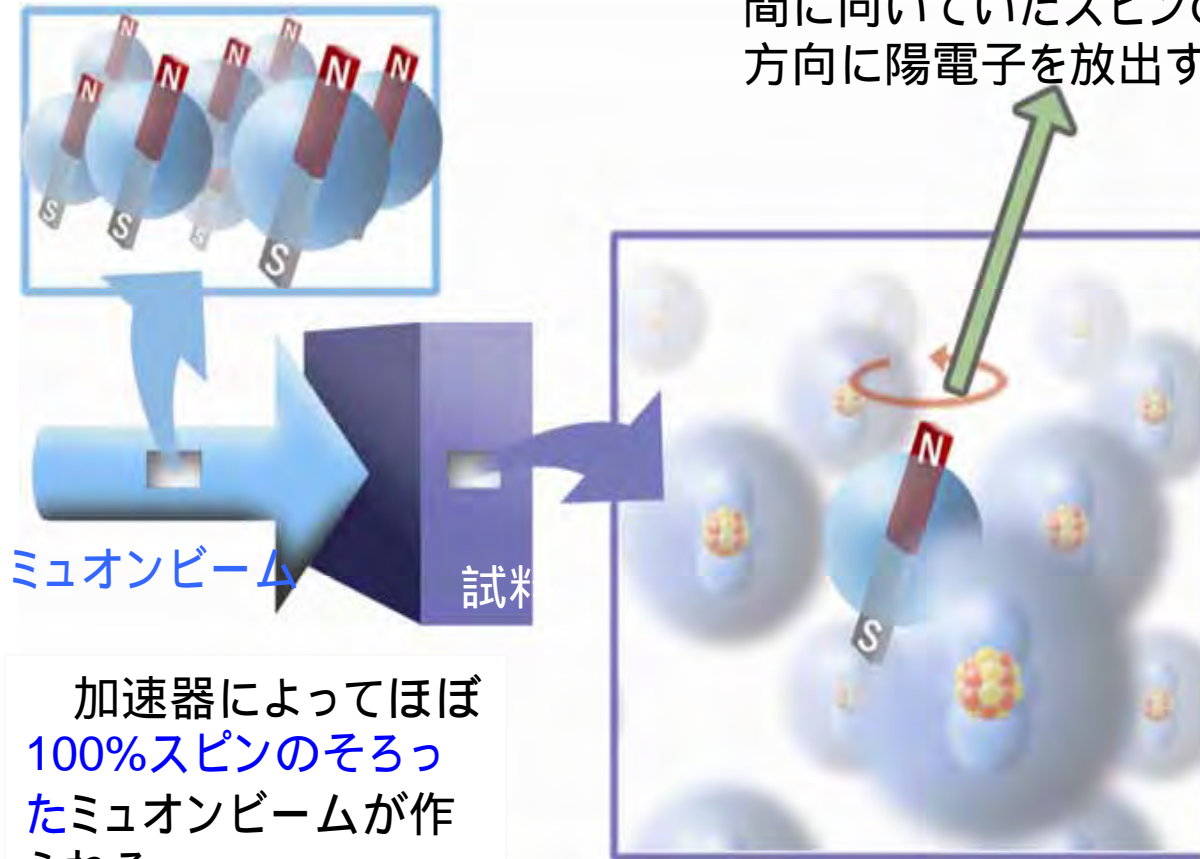
磁石のような性質



ミュオンは原子サイズの方
位磁石！

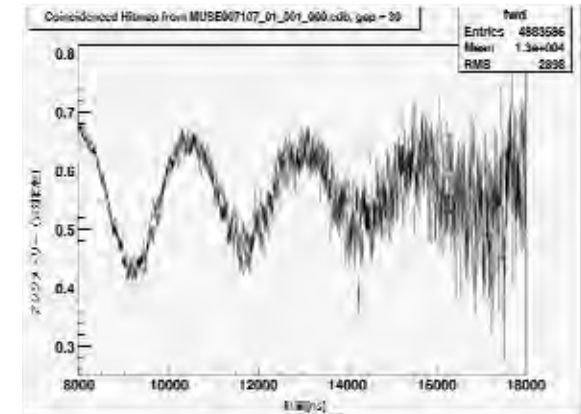
ミュオン = 物質内部の磁気プローブ

μ SR (ミュオンスピン回転) ミュオンは崩壊する瞬間に向いていたスピンの方向に陽電子を放出する。



加速器によってほぼ100%スピンのそろったミュオンビームが作られる。

試料に入射したミュオンは原子と原子の間に止まり、そこでの磁場を感じて歳差運動する。

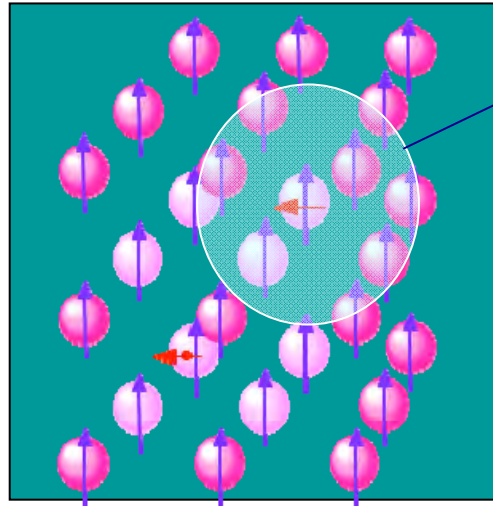


J-PARCに設置された μ SR実験装置と得られた時間スペクトル

放射光や中性子との違い

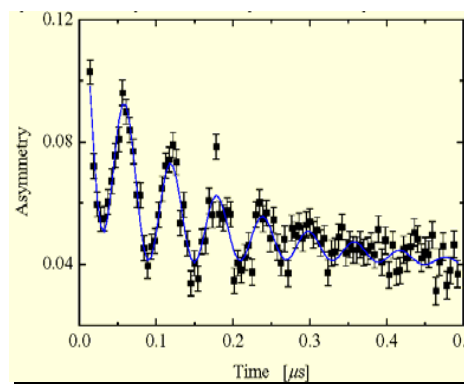
例: 磁気秩序(強磁性)状態の観測

ミュオン(注入)



最隣接の磁気モーメントからの双極子磁場へのみ敏感

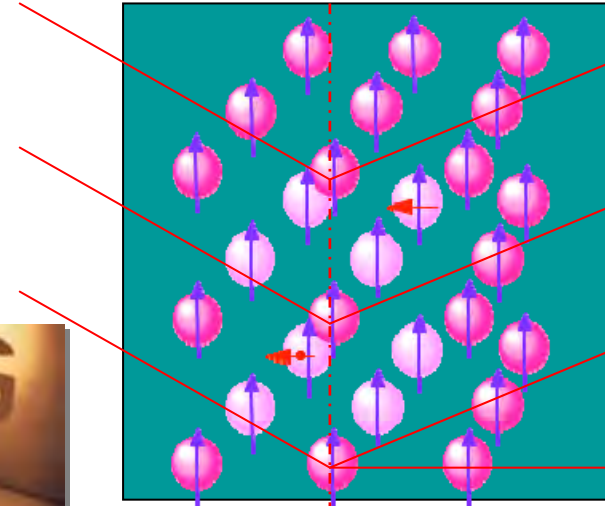
局所的な情報を反映



1つ1つの原子の磁気モーメントの大きさを観測

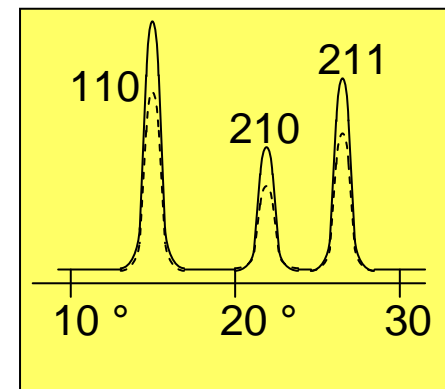
内部磁場によるミュオンスピンの回転(振動数は磁気モーメントに比例)

中性子・放射光(散乱)



すべての原子からの散乱強度の和を観測

巨視的な長さでの平均構造を見る



体積平均した磁気モーメントの大きさを観測

磁気散乱による回折強度の増大

相補的

J-PARC MUSE全体計画

MUSE: MUon Science Establishment

Sライン

低速 (4 MeV)

正ミュオン

超低温 / 強磁場
/ パルス励起
μSR物性研究.

Hライン

低速 (4 MeV) ~
高速 (50 MeV)

正・負ミュオン
大強度・原子物
理/素粒子実験.

Uライン

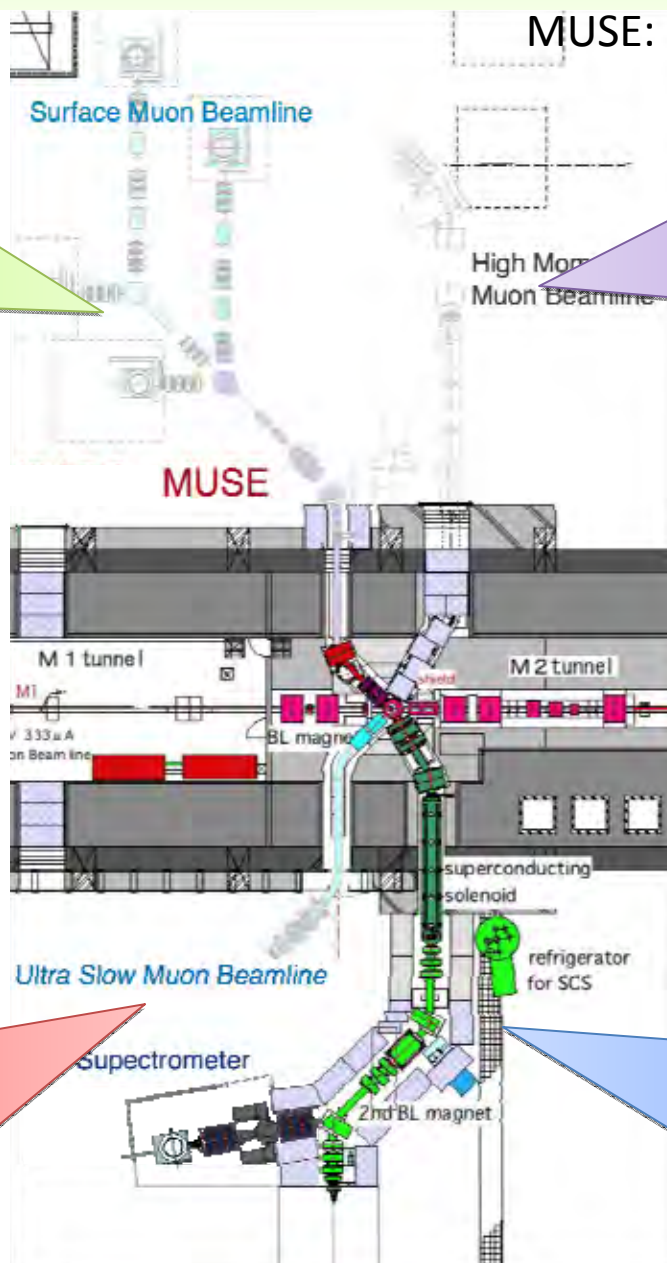
超低速 (0.1 ~ 30
keV) 正ミュオン

ナノメートル深さ分
解能/表面・界面
物性研究.

Dライン

低速 (4 MeV) ~
高速 (50 MeV)

正・負ミュオン
汎用ビームライン.



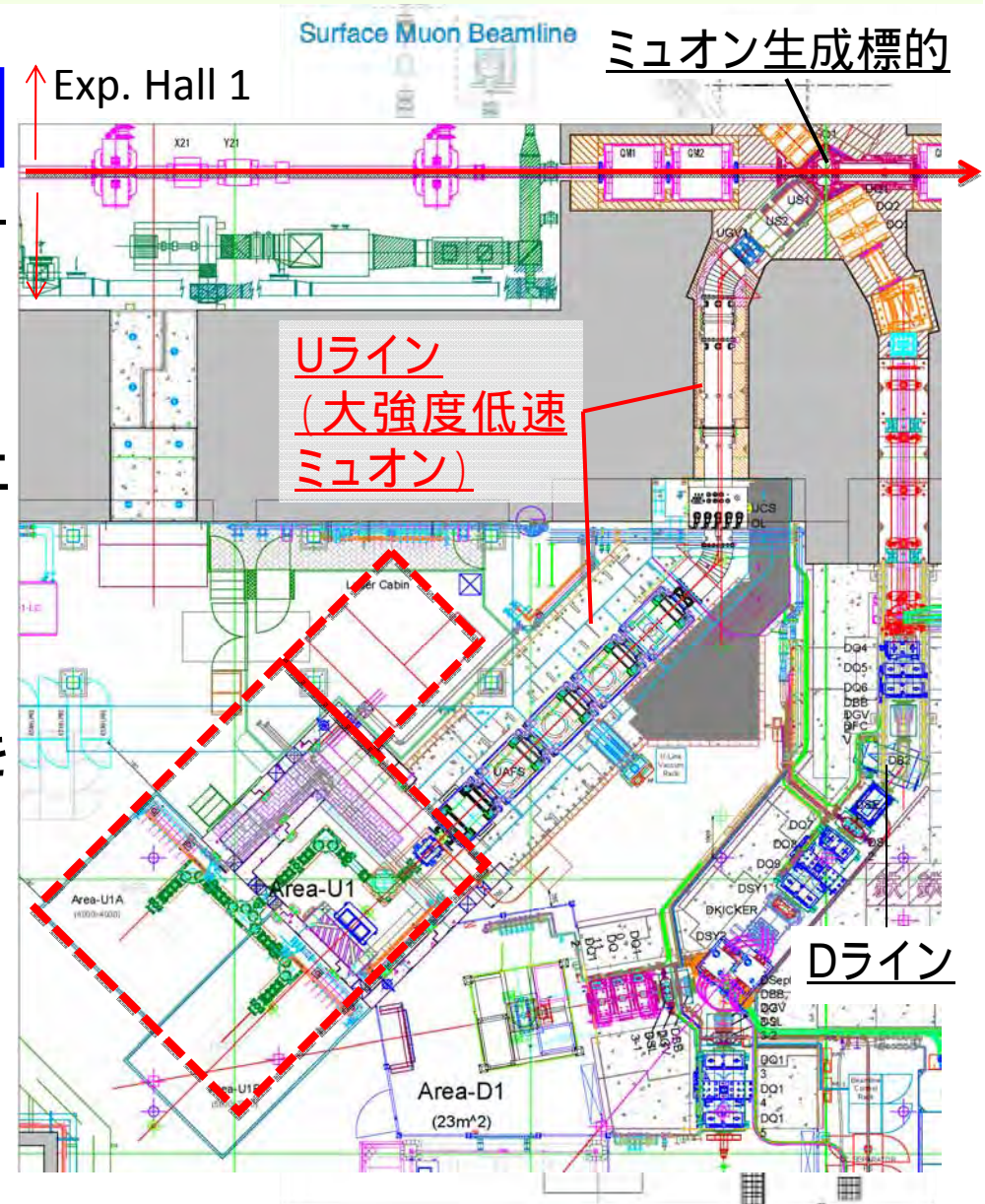
現在の整備状況

Dライン(低速・高速ミュオン)

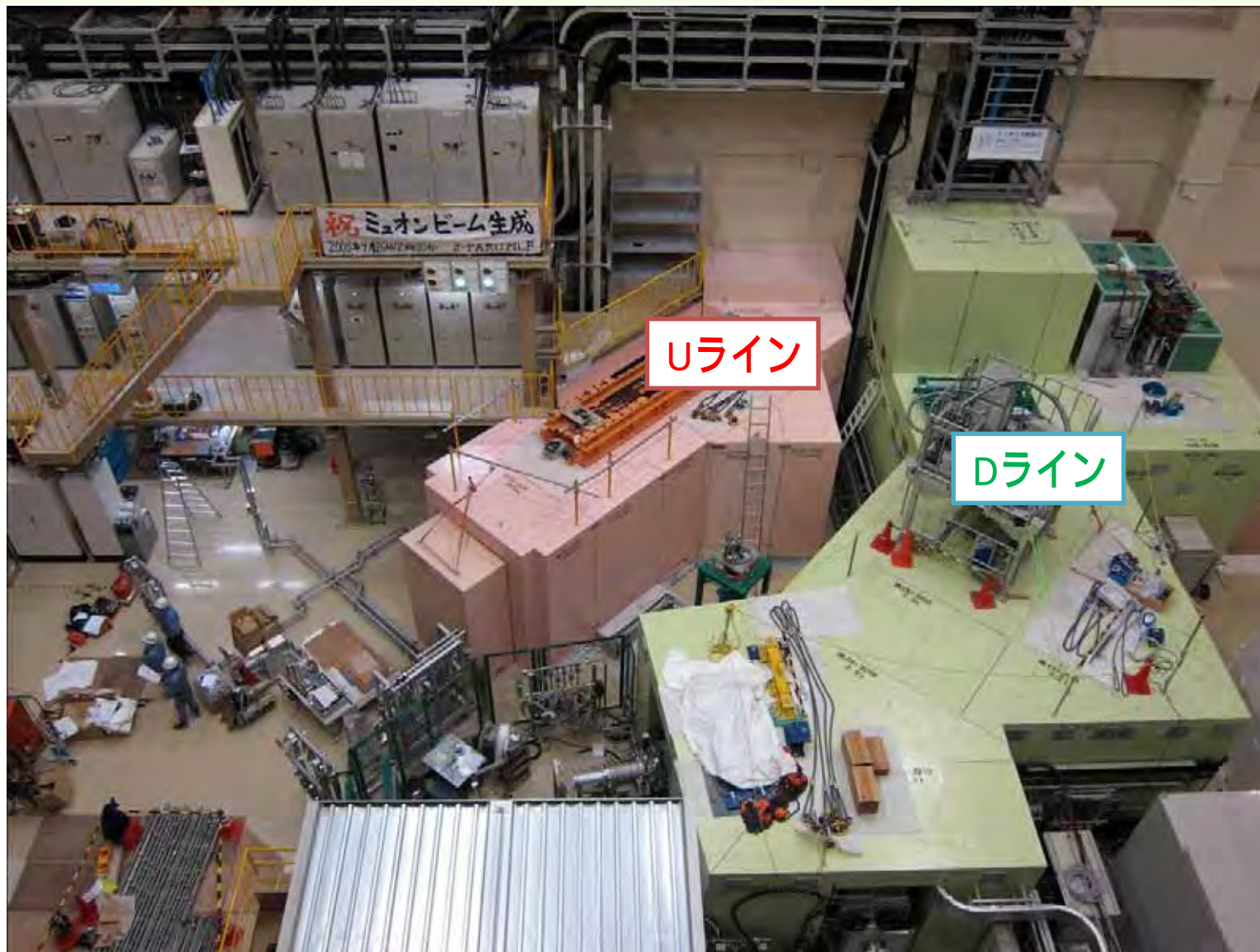
- ・大学共同利用に供されている唯一のビームライン(2008年12月～)。
- ・ μ SR分光器はD1エリアに1台(中古)のみ。
- ・ビームキッカーを整備中(D1、D2エリアで同時に実験可能に)。

Uライン(超低速ミュオン)

- ・大強度表面ミュオンビームラインを建設中(2010年度～)。
- ・超低速ミュオン発生装置、および実験装置については科研費新学術領域(代表:鳥養映子)の資金にて建設中(2011年度～)。
- ・最初のビーム実験を2012年度末に予定。



現在の整備状況



MLF第2実験ホール (Feb. 2012)

研究成果@Dライン

世界最高パルスミュオン強度を達成

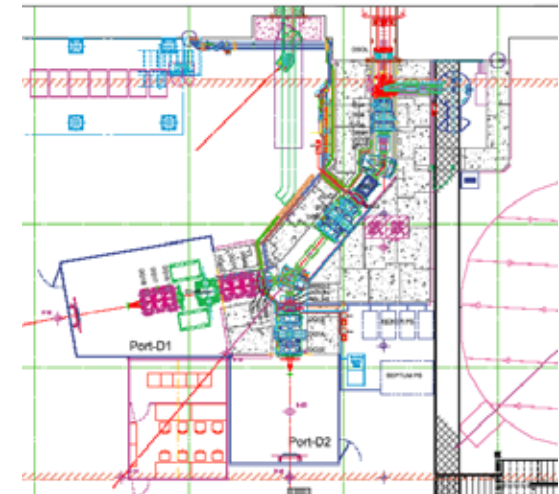
陽子ビーム出力120 kWで世界最高強度のパルス状
ミュオン発生・供給開始 (since Novemembr 2009).

2010年3月16日(火) 読売新聞に記事掲載

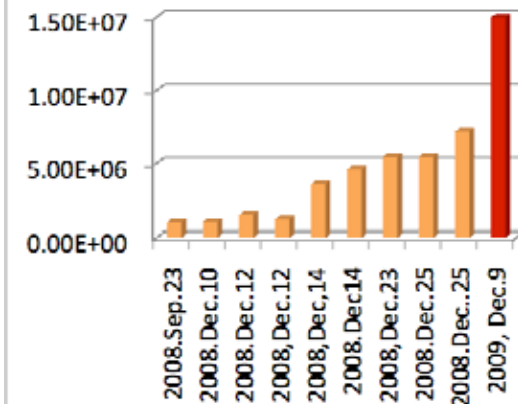
「世界最高出力を達成 J-PARC『ミュオン』発生装置」

| Muon source | Number of μ^+ /pulse |
|-----------------|-------------------------------|
| J-PARC MUSE | 72,000@120kW 180,000@300kW |
| RAL ISIS (U.K.) | 30,000@160kW |

ミュオンDライン



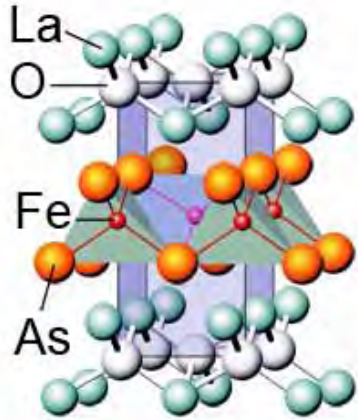
Muon Yield in case of 1MW



研究成果@Dライン

鉄系超伝導体の島状超伝導を発見

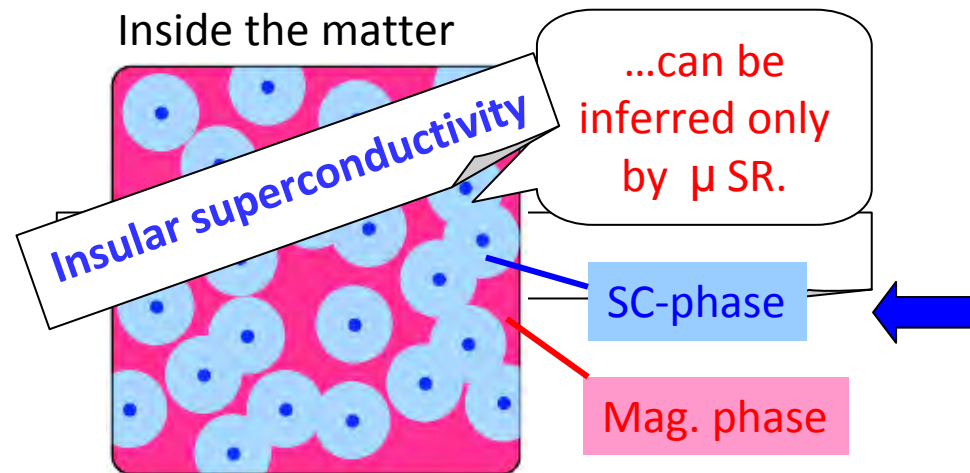
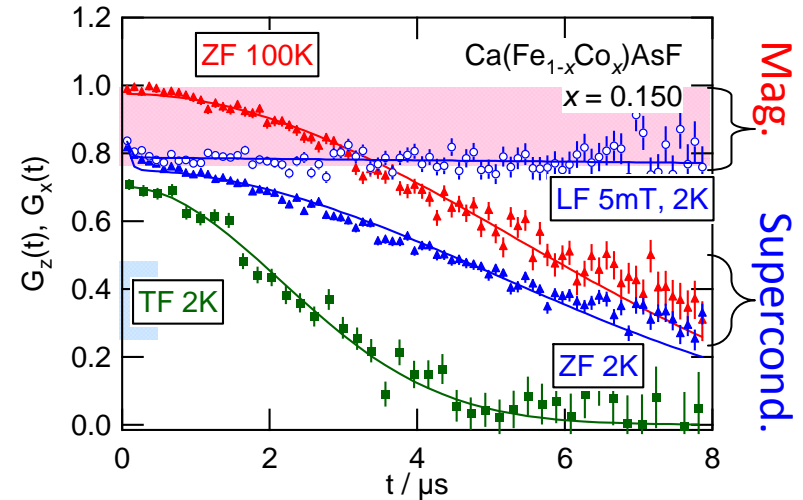
KEK物構研-東工大応用セラミックス研



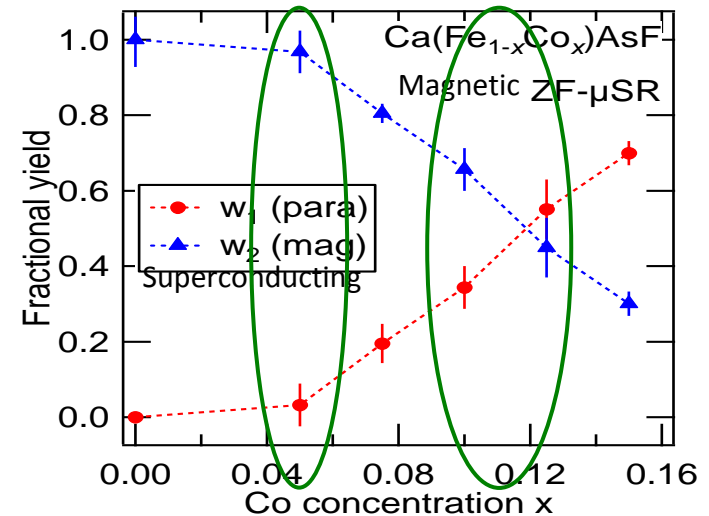
LaFeAsOの
結晶構造

超伝導を担うFeAs面のFeをCoで置換すると、通常は超伝導が阻害されると予想されるが、鉄砒素系では超伝導が発現！

ミュオンspin回転で同系物質 $\text{CaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsF}$ について調べ、超伝導が島状に発達し、磁性相と共存していることを発見。



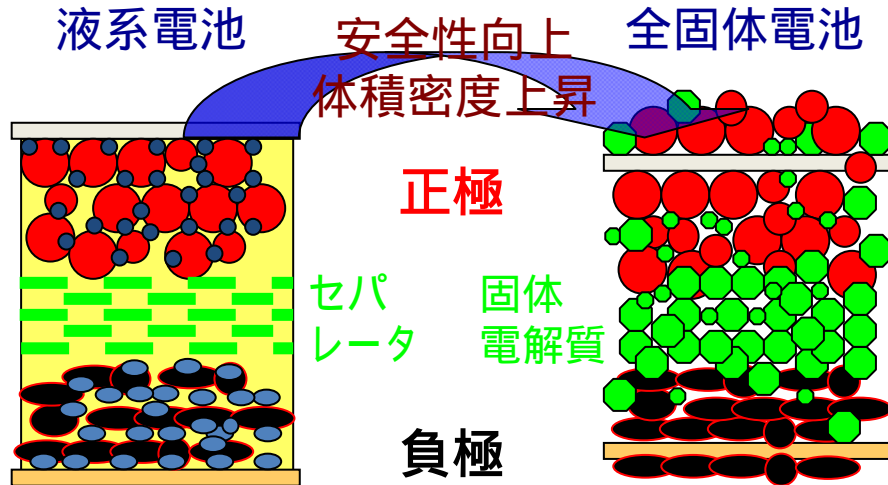
J-PARCからの最初の出版データ



研究成果@Dライン

電池電極材料中のLi拡散の観測に成功

豊田中研-KEK物構研



| 正極 | 電解質 | 負極 |
|---------------------------|--|--|
| LiCoO_2 | LiPF_6 | グラファイト |
| LiNiO_2 | $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$ | $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ |
| LiMn_2O_4 | $\text{Li}_5\text{La}_3\text{Bi}_2\text{O}_{12}$ | ... |
| LiFePO_4 ... | ... | ... |

全固体電池の開発のためには、正極・固体電解質・負極の界面も含めて、連続的にLi拡散を測定する手法が必要。NMRや電気化学測定では困難だが、 μSR なら可能。

J. Sugiyama *et al.* (豊田中研) *Phys. Rev. B* **82**, 224412 (2010)

原理: Li拡散による正極中の微小な磁場変動を μSR で検出する。

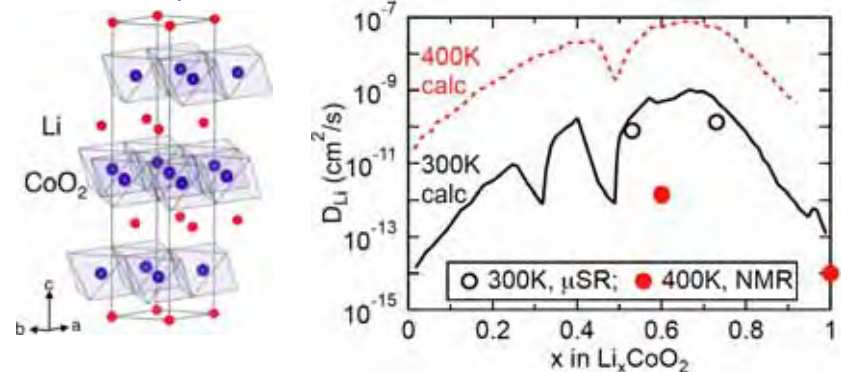
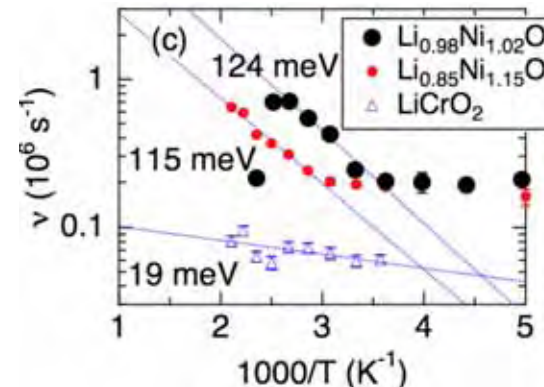


図1(左) LiCoO_2 の結晶構造と(右) μSR で見積もった Li_xCoO_2 のLi拡散係数をNMR結果と比較。
Phys. Rev. Lett. **103**, 147601 (2009).



J-PARCで測定

図2 LiNiO_2 と LiCrO_2 の核磁場変動速度の温度依存性。これからLiの拡散係数を求めた。

研究成果@Dライン

銅酸化物と類似の新化合物を発見

Ba₂IrO₄は代表的な銅酸化物超伝導体と同じペロブスカイト構造を持つが、巨視的な物性量に何も異常が見つからない。基底状態は何か？

(イリジウムは中性子の吸収体:中性子散乱が使えない!)

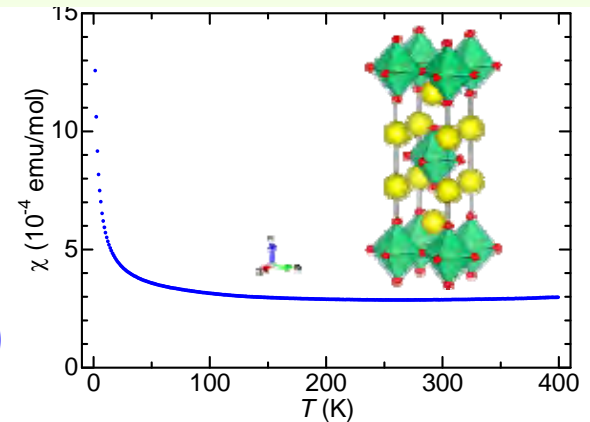


Fig. 1 Ba₂IrO₄が示す一様帯磁率の温度依存性(枠内の図は結晶構造)

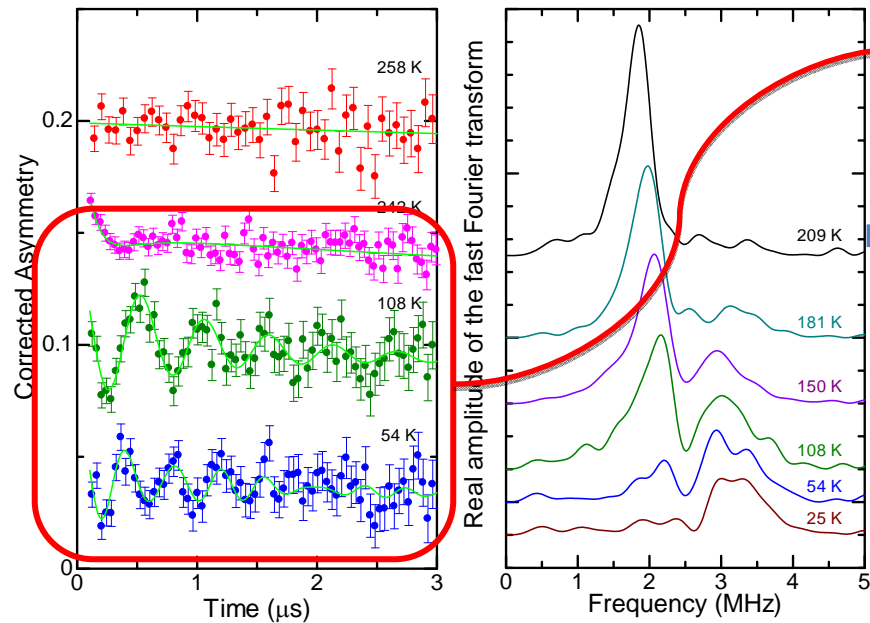


Fig. 2 ゼロ磁場ミュオンスピン回転信号(左)とそのフーリエ変換(右)

ミュオンスピン回転で同物質について調べ、銅酸化物同様に比較的高温 (~ 240 K) から反強磁性秩序を示すことを発見。

銅酸化物と同じ反強磁性モット絶縁体であることを示唆。

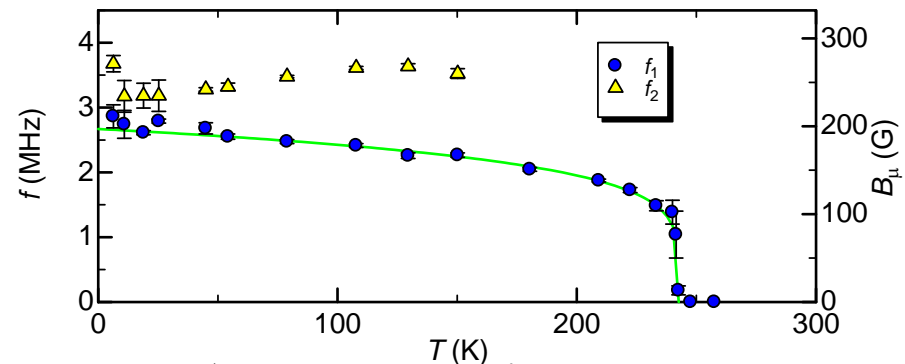


Fig. 3 ゼロ磁場ミュオンスピン回転周波数 f_i ($i=1,2$).

解決すべき課題

1) ビームタイムの絶対的不足@Dライン

- 利用可能なビームタイム

80日/半期

- 要求されるビームタイム

| | | |
|----------------|-----------------|---------|
| ・一般課題 | 25件/半期、必要ビームタイム | 4日/課題 |
| | 全ビームタイム | 100日/半期 |
| ・装置G課題(調整・高度化) | | 10日/半期 |
| ・プロジェクト型課題 | | 20日/半期 |

小計 130日/半期

- 潜在的な需要

| | |
|----------------|--------|
| ・日本人研究者の国外施設利用 | 80日/半期 |
| ・理研-RALでの協同研究 | 80日/半期 |

小計 160日/半期 総計270日/半期

...現在の国内ミュオン利用者の需要は供給力の3倍強

- 5年後の予想利用者数 ~ 280-410人(現在 ~ 150人)

2) 専用装置を必要とする極限試料環境への要求

汎用ビームラインとしてのDラインでは対応困難

解決すべき課題

3) Hラインへの中・大規模実験提案

• 3件の物構研ミュオン共同利用S型課題

1.2011S01:「ミュオニウムの超微細相互作用構造およびミュオン磁気モーメントの精密測定」(下村浩一郎)

2.2011S03:「RCSからのパルス陽子ビームを活用したミュオン電子転換過程の探索実験」(青木正治)

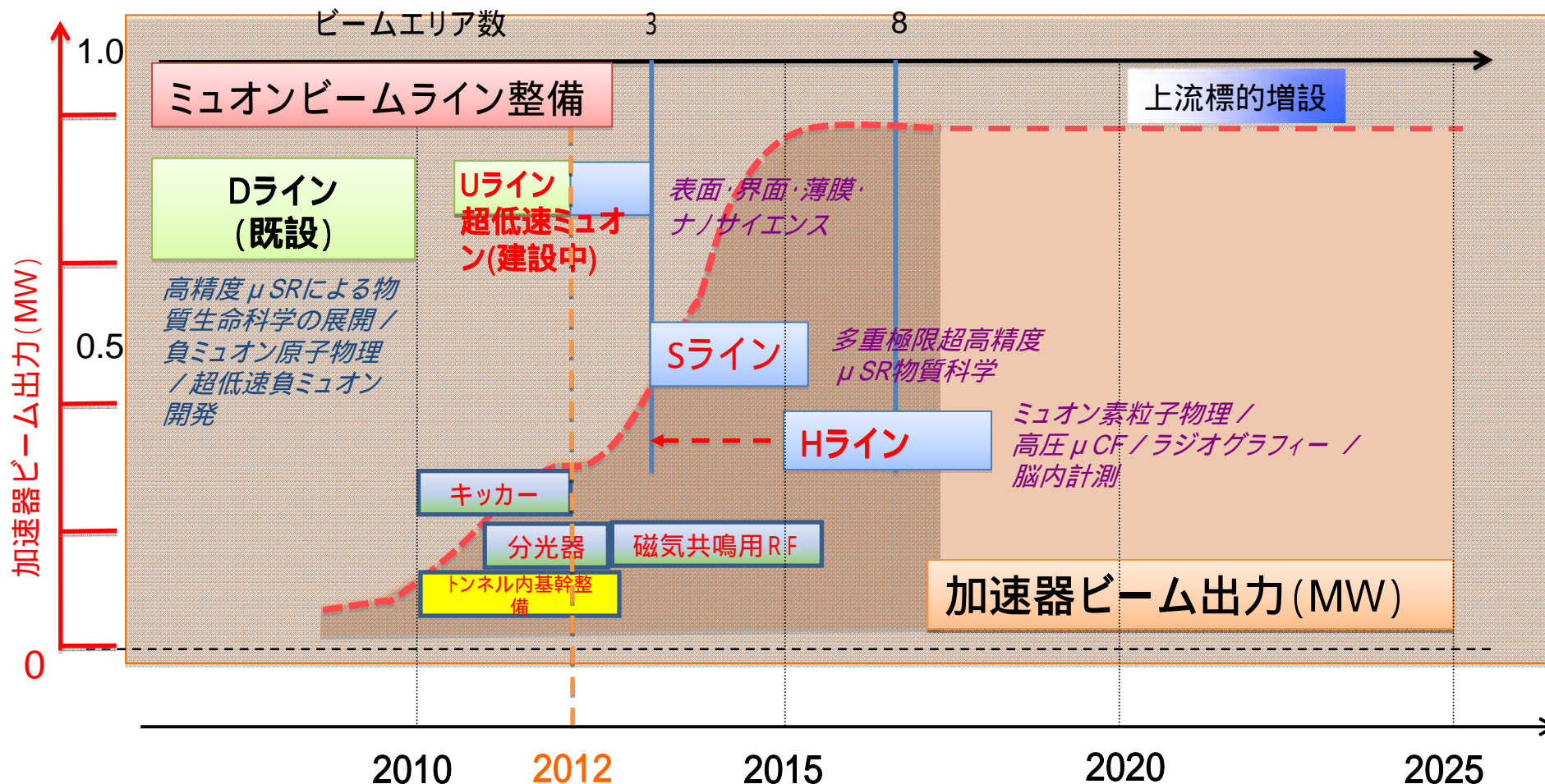
3.2011S04:「J-PARCにおけるミュオン異常磁気能率と電気双極子能率の測定実験」(斉藤直人)

...いずれも物構研ミュオン共同利用実験課題審査委員会で一次採択され、最終(二次)採択へ向けてR&D、資金獲得努力が行われている。

1)、2)の解決のためにはSラインを直ちに整備する必要あり。
3)への対応としてHラインの整備を前倒しする必要あり。

将来計画

ミュオン科学ロードマップ



日本学術会議、「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン2011」
J-PARC MLF (物質・生命科学実験施設) の整備計画より

将来計画

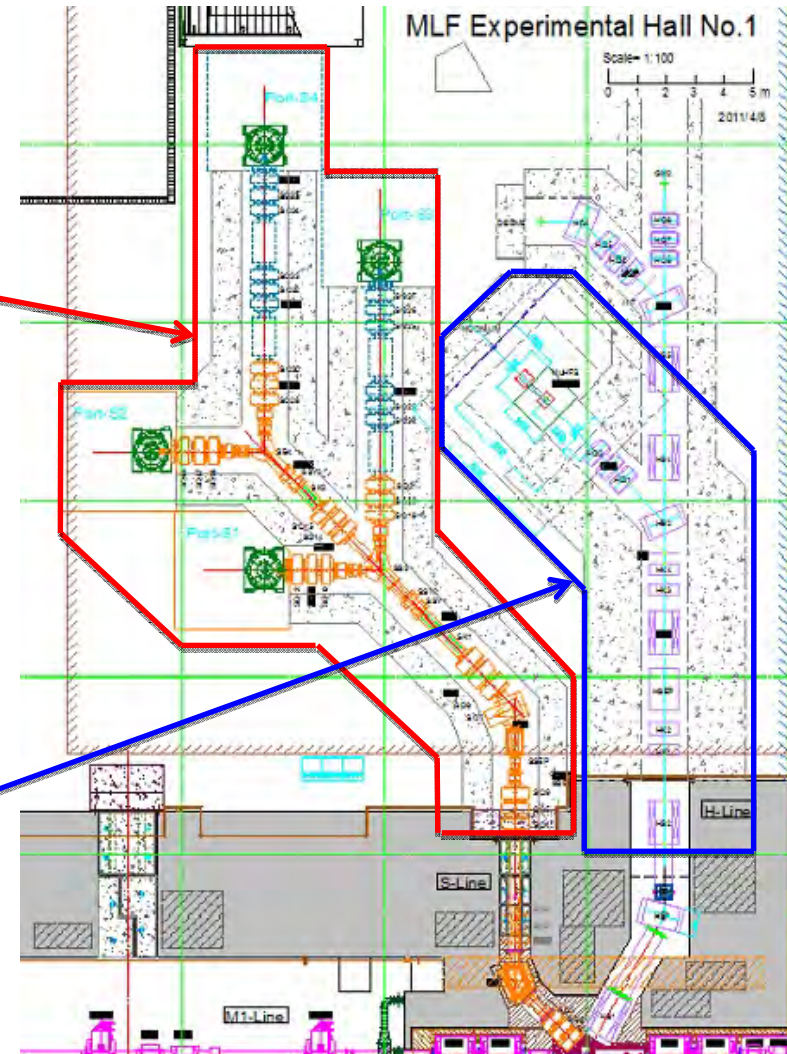
ミュオン整備計画(～5年以内)

Sライン基幹設備整備

ビームライン
S1実験エリア
S2-4ビームライン・実験エリア

Hライン基幹部整備

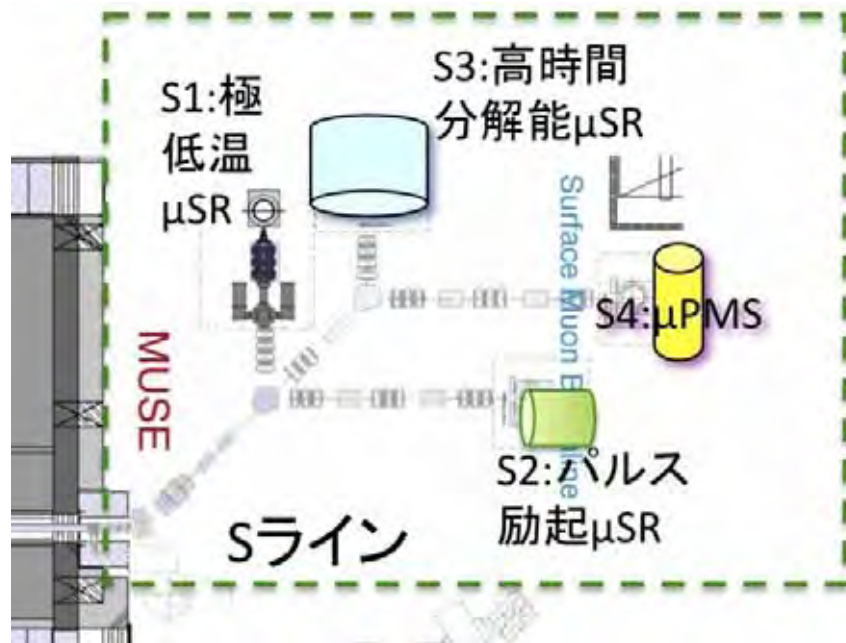
ミュオン輸送装置(BL主部)
実験エリア、電源ヤード
遮蔽体
冷却水、電気インフラ



将来計画

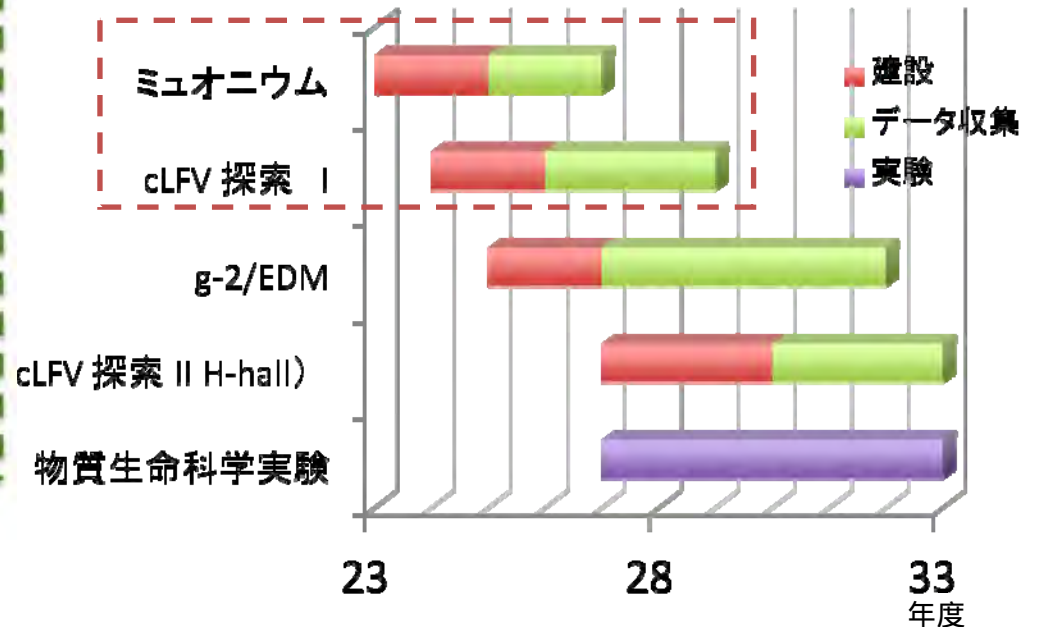
• Sライン

- 複数の特殊装置専用BLで多彩な μ SR物質科学を展開
 - 極低温 μ SR
 - 高時間分解能 μ SR
 - パルス強磁場/励起下 μ SR
 - μ PMS



• Hライン

- 1つの実験エリアまでの基幹部を整備
 - ミュオニウムHFSの測定etc
- 逐次BLを整備拡張
 - ミュオンg-2/EDMの測定
 - μ -e転換探索実験I,II
 - 高圧 μ CF、ラジオグラフィー、脳内計測



FIN



MLF共用の推進等について

登録機関との連携、利用の全体スキーム

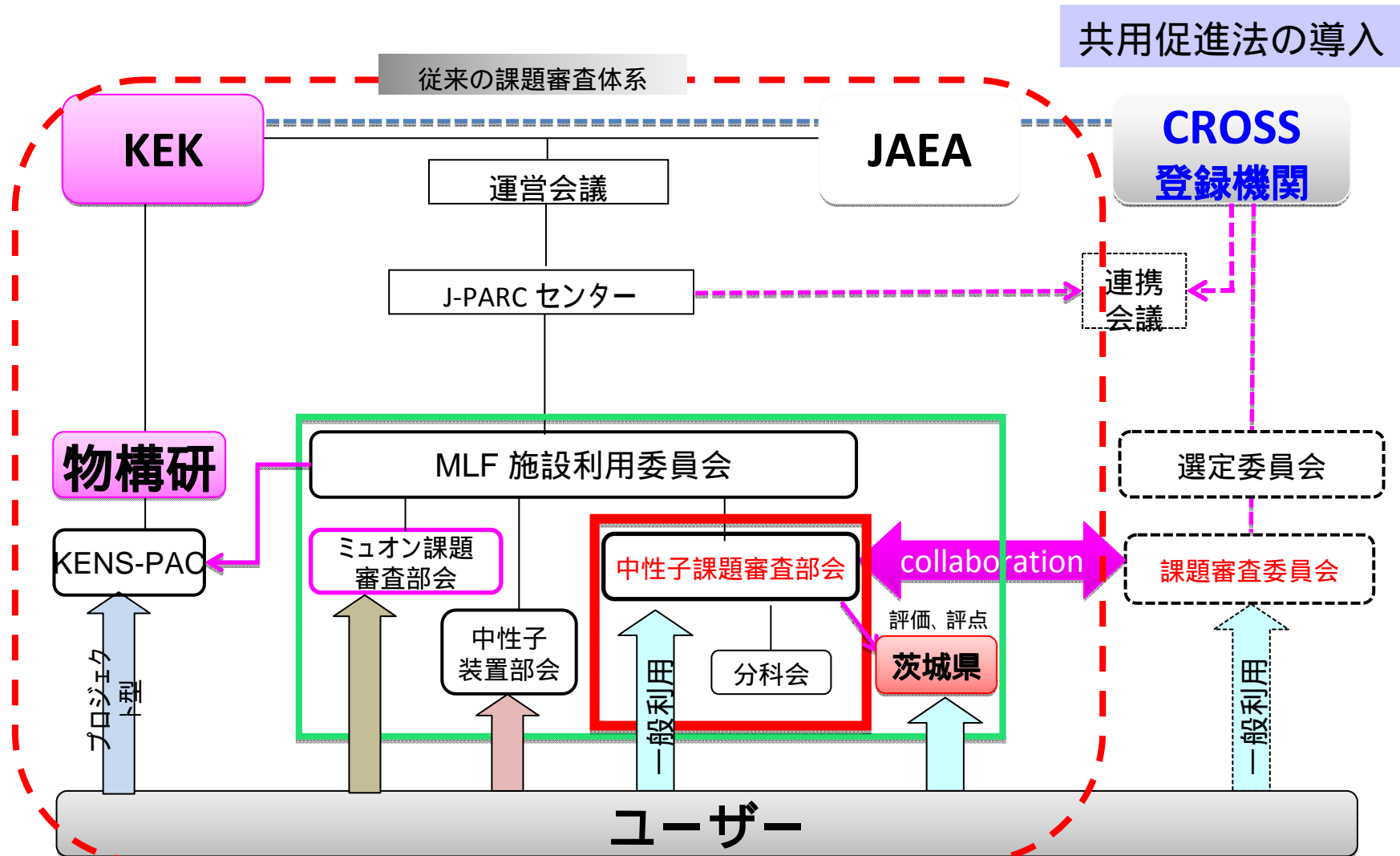
J-PARCセンター

池田裕二郎



J-PARC MLFにおける課題審査体系

国際性、学術から産業界まで、透明性、公平性、競争原理、（ 、100- ）原則
→ **幅広い利用と質の高い成果の創出**





共用法の導入

< 国（文部科学省） >

特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律（共用法）

特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律施行規則（**施行規則**）

特定先端大型研究施設の共用の促進に関する基本的な方針（**基本方針**）

< 設置者 >

日本原子力研究開発機構 JAEA

特定中性子線施設の共用施設の建設・
維持・管理・運転・高度化
（加速器・線源・共用BL）

専用BLへの安定したビーム供給・
便宜供与



< 登録機関 >

総合科学研究機構 CROSS

利用促進業務

中性子線共用施設（共用BL）
利用者選定業務
利用支援業務
中性子線専用施設（専用BL）
選定・評価

H21年7月施行

特定中性子線施設
@J-PARC

広範な分野の研究者の活用

・利用者の
ニーズ

・利用の
応募

・公正な課題選定
・情報提供、研究相談
技術指導等

利 用 者

（大学・独法・民間等； 基礎研究～産業・医療利用）



中性子BLの分類

設置者

○ JAEA-BL

○ KEK-BL

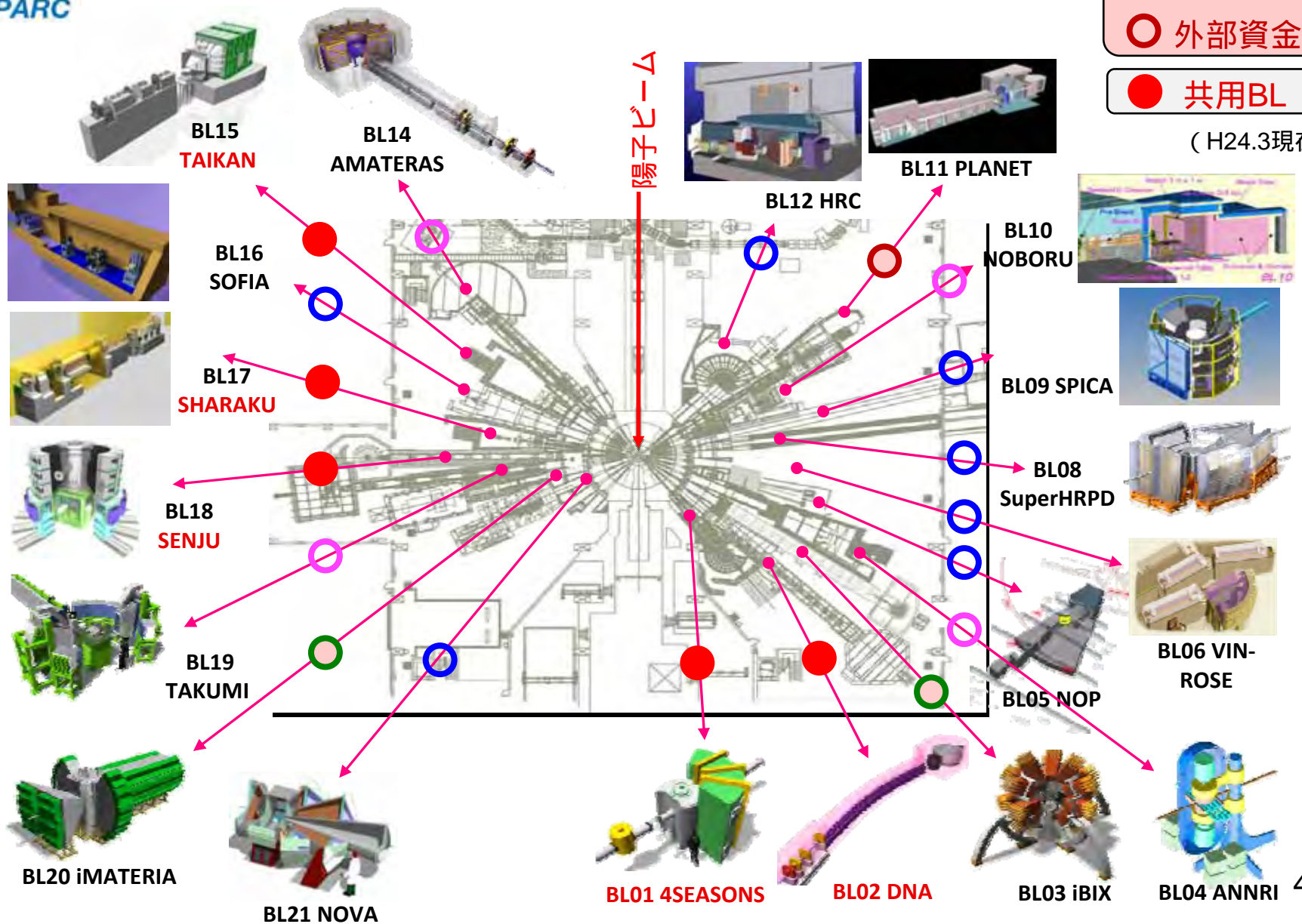
専用

○ 茨城県BL

○ 外部資金BL

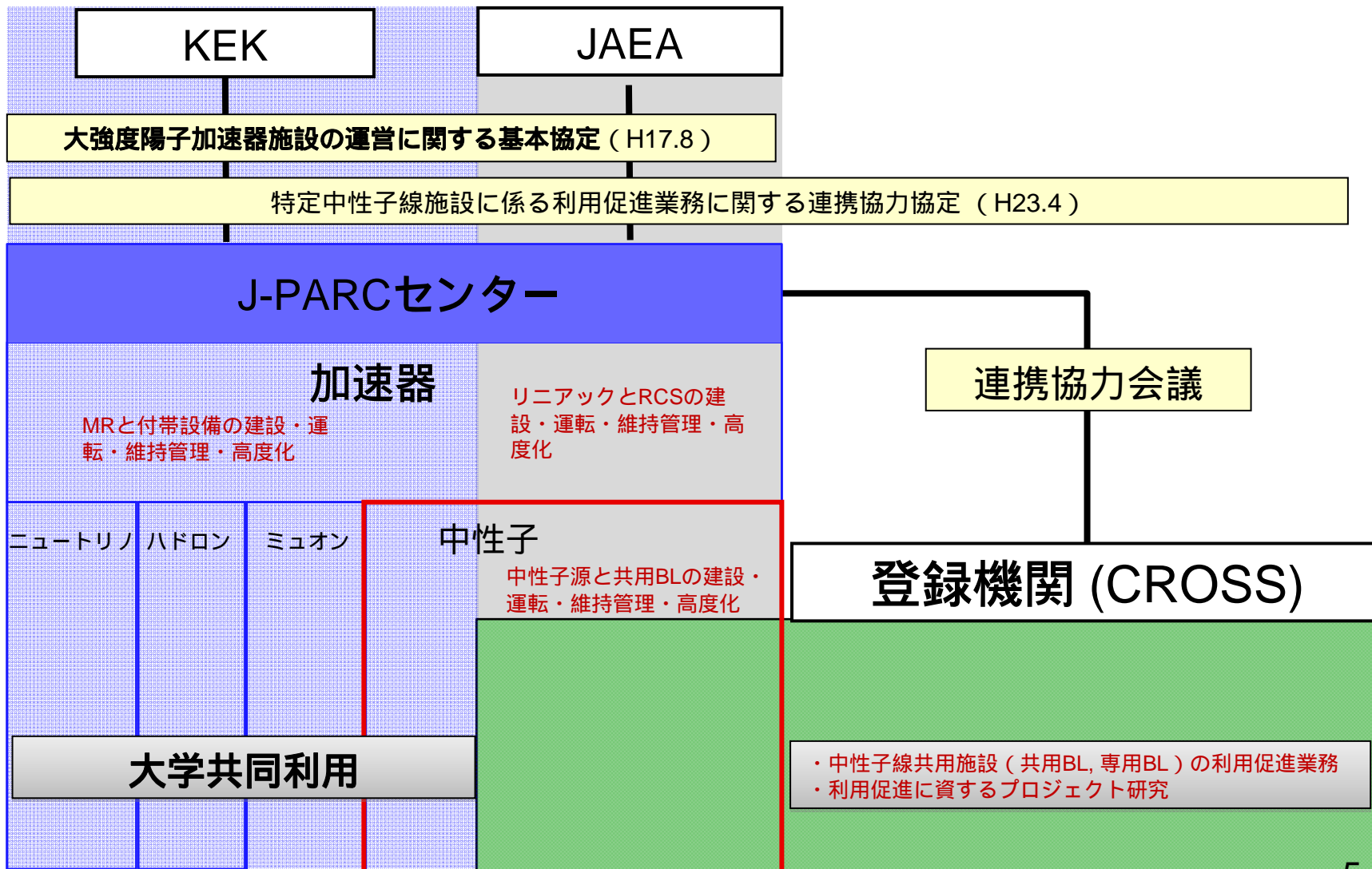
● 共用BL

(H24.3現在)





JAEA, KEK, J-PARCセンター、登録機関の関係図

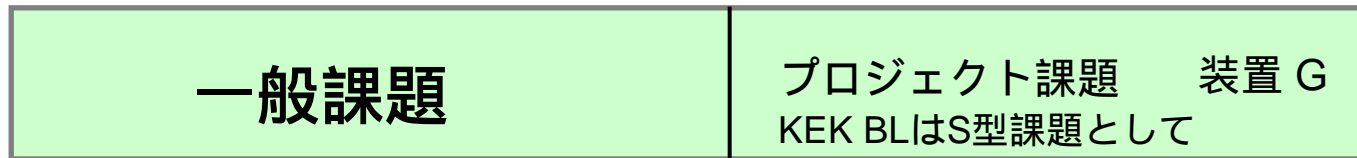




課題審査の流れと課題区分、割合

年2回一般課題の公募。4名のレフェリーによる査読、課題審査部会での審議（中性子課題審査部会、ミュオン課題審査部会）
(装置グループ課題、プロジェクト課題は、それぞれ、JAEA, KEK, CROSSの委員会で審査)

JAEA & KEK BL
(設置者 BL)



J-PARCセンター運営

茨城県装置

専用装置



設置者占有率 (β %); ($\beta=80$ 茨城県)

CROSS

共用装置

(設置者 JAEA)



> 60%

- 一般課題枠
- 重点課題枠
- CROSS 開発課題枠 <15%
- JAEA プロジェクト および 装置G枠 <25%



現状課題審査体制（一般利用・装置提

特定中性子線施設に係る利用促進業務に関する連携協力協定（H23.4 締結）

KEK
機構長

JAEA
理事長

CROSS
理事長

J-PARCセンター
(JAEA/KEK)

J-PARC
センター長

連携協力会議

CROSS東海
センター長

登録機関
(CROSS)

MLF施設
利用委員会

← 午前午後 →

選定委員会

専門委員会

共用BL以外

共用BL

ミュオン課題
審査部会

分科会(2)

レフリー

ミュオン課題

中性子課題
審査部会

利用研究課題
審査委員会

合同

開催

分科会(8)

分科会(8)

合同開催(分科会毎)

レフリー

レフリー

中性子課題

専用BL以外

専用BL

ミュオン実験
装置部会

分科会

ミュオン装置

中性子実験
装置部会

分科会

中性子装置

専用施設
審査委員会

分科会

中性子装置

合同

開催

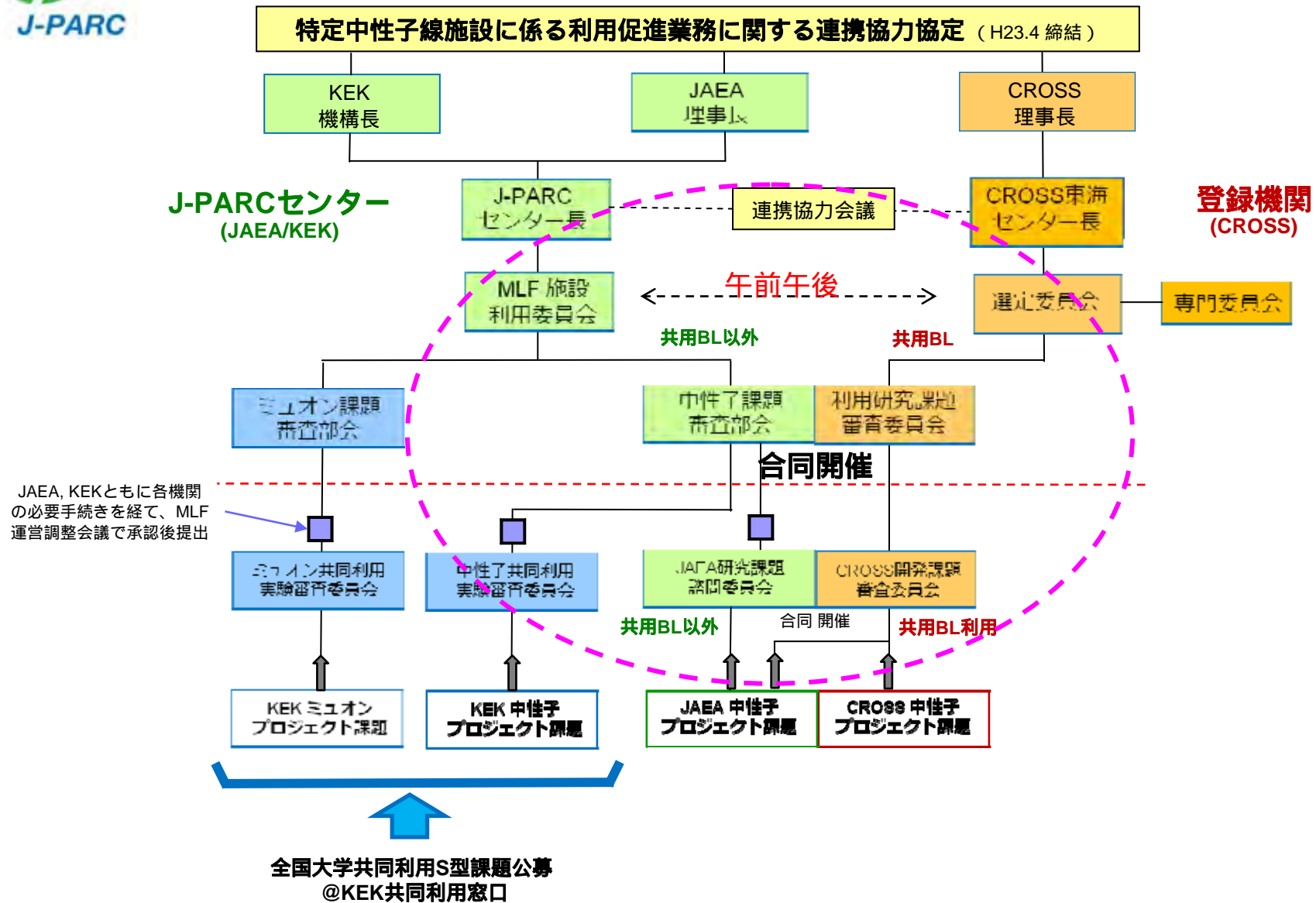
一元化窓口

全申請 @J-PARC ユーザーズ・オフィス

前回評価の指摘2
専門部会の下に課題分野ごとの専門的分科会を設けることが適当



課題審査体制（プロジェクト利用）





前回評価部会での審査に関する指摘事項への対応状況

前回評価の指摘 3

中性子利用に関して、JRR-3 との合同審査体制の構築など、一律的な運営を目指した検討が必要

前回評価の指摘 6

J-PARC と JRR-3 は相互補完の関係にあり、今後のニーズの広がりを見ながら、両者の一体的な運営と同時に有効な使い分けの方策を検討すべき

- 中性子コミュニティの総意として J-PARC 中性子と JRR3 中性子の利用課題の合同審査、さらに、窓口の一元化が強く求められていることの重要性は認識。
- これまでに、JRR 3 利用推進の担い手である JAEA 量子ビーム応用研究部門と J-PARC センターで一元化を目指した今後の利用体系の在り方について検討を断続的に進めている。
- まだ、いくつかの克服すべき課題があるものの、量にビームプラットフォーム構想も視野に入れつつ、実現に向けてさらに努力してゆく。

前回評価の指摘 4

両機関は、機関の評価に際しては異なった評価基準で評価を受けることに留意する必要がある
一方、ユーザー側からは、このような利用体系を意識することなく利用できるような配慮が必要

- 共用法の導入により、幅広い利用による成果創出が JAEA のミッションとなったため、利用促進という観点での J-PARC 利用の評価に JAEA と KEK の機関間の差異は小さくなった。
- J-PARC 利用課題審査に於いては、各機関 (JAEA, KEK、茨城県、登録機関) 間で基本となる統一基準を共有して審査を行っている。
- 従って、一般利用者は、J-PARC 内の個別の組織上の事情による利用体系を意識する必要の無い運用システムを実現している。