

超低速ミュオンプロジェクト

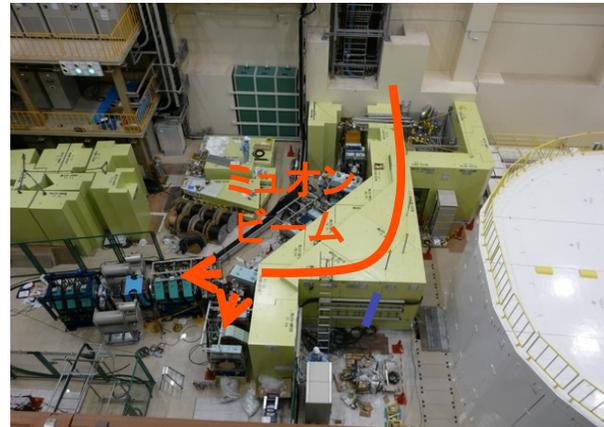
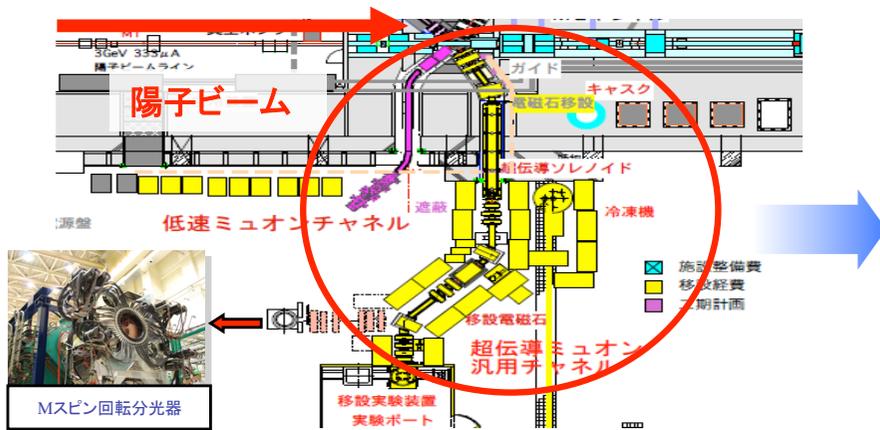
J-PARCで実現される 高輝度,大強度**超低速ミュオン**源

KEK 三宅康博

- 超低速ミュオンとは
- 超低速ミュオンビームを創る。
 - KEKでのこれまでの開発の経緯
 - RIKEN-RALでの開発研究
- J-PARC -MUSE大強度超低速ミュオン源
- 超低速ミュオンで展開されるサイエンス

J-PARCミュオン施設(MUSE)

- ミュオン施設は、陽子ビームを標的である炭素原子に衝突させ、発生するパイ中間子の崩壊で得られるミュオンを用いる実験施設(物質・生命科学実験施設(MLF)内)。
- ミュオンは物質内部の磁気を高感度に反応するため、物質に入射することでその内部のミクロな電磁氣的性質を解明するのに有効な手段となる。
- 平成20年9月にミュオンのファーストビームの取り出しに成功。12月より共同利用実験開始。
- 物質科学・材料科学等の基礎研究の推進のみならず、磁性材料や燃料電池の開発研究、負ミュオン特性X線非破壊元素分析など、様々な分野の発展にも大きく貢献。



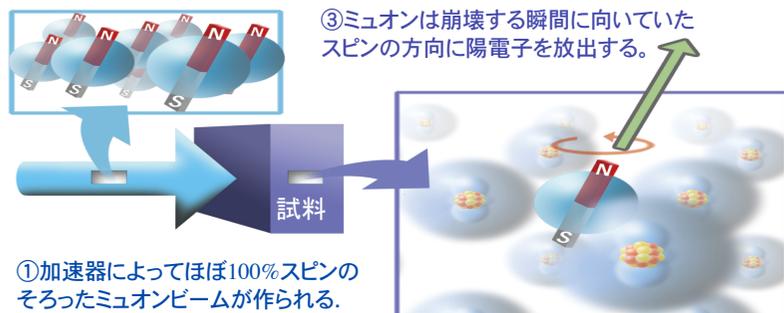
採択課題(応募)

2008年B期: 5件(6件)

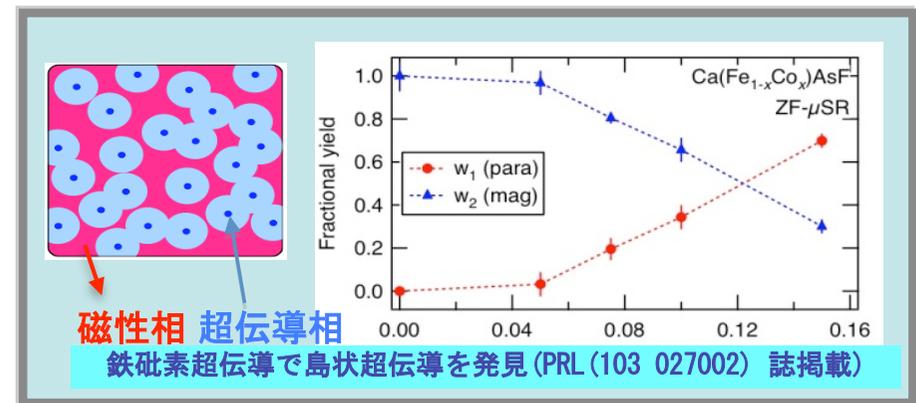
2009年A期: 12件(13件)
(※うち、3件はビームタイム未提供)

2009年B期: 11件(11件)

<ミュオンspin回転のしくみ>



④ 放出された陽電子の方向等を調べることで、物質内部の磁性などの性質を調べることが出来る。



J-PARC ミュオン科学実験施設で展開される物質研究

表面ミュオン (4.1 MeV) の特徴

- 1) 100% スピン偏極
 - 感度の良いマイクロな磁性プローブ
- 2) 特性時間 10^{-9} - 10^{-5} 秒
 - 中性子散乱とNMR測定の谷間を測定
- 3) 軽い水素同位体
 - 水素の1/9の質量を持つミュオンは、軽い水素同位体として振る舞う。
- 4) 電子を創生し、観測する。(Active Probe)

- 高温超伝導体系
- 量子拡散
- 低次元磁性体系
- ヘビーフェルミオン系
- Frustrated 系
- Penetration depth測定
- Soliton, polaronの研究

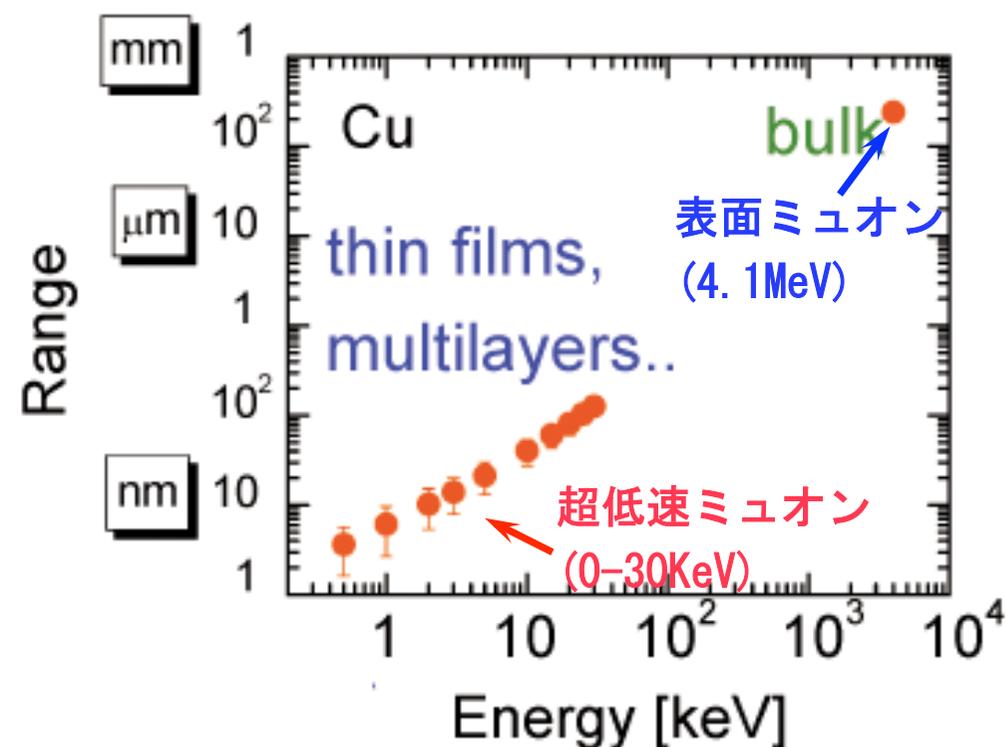


μ^+ スピンを持った軽い水素原子

超低速ミュオンとは？/表面ミュオンとの比較

	表面ミュオン	超低速ミュオン
ビームエネルギー	4.1MeV	0-30 keV
銅中での飛程	約 0.2 mm	0 nm - 200 nm
エネルギー幅	10% 程度	$\ll 1\%$
ビームサイズ/試料のサイズ	30 mm x 40 mm	3mmx 4mm --> 1 ϕ
ビーム時間幅	100 ns 以上	8.3 ns --> ps

- 低速である。(0-30 keV)
 - ◆ 打ち込み深さを制御可能
0nm-200nm
 - ◆ 深さ方向の位置分解能
2-5 nm、@J-PARC 1 nmをめざす。
- 高空間分解能
 - ◆ 現在、3x4 mm²,@J-PARC ϕ 1mm
- 高時間分解能
 - ◆ 現在、8 ns, @J-PARC 1 ns目標
- BGが小さい。
- 外部同期可：極端条件下での測定



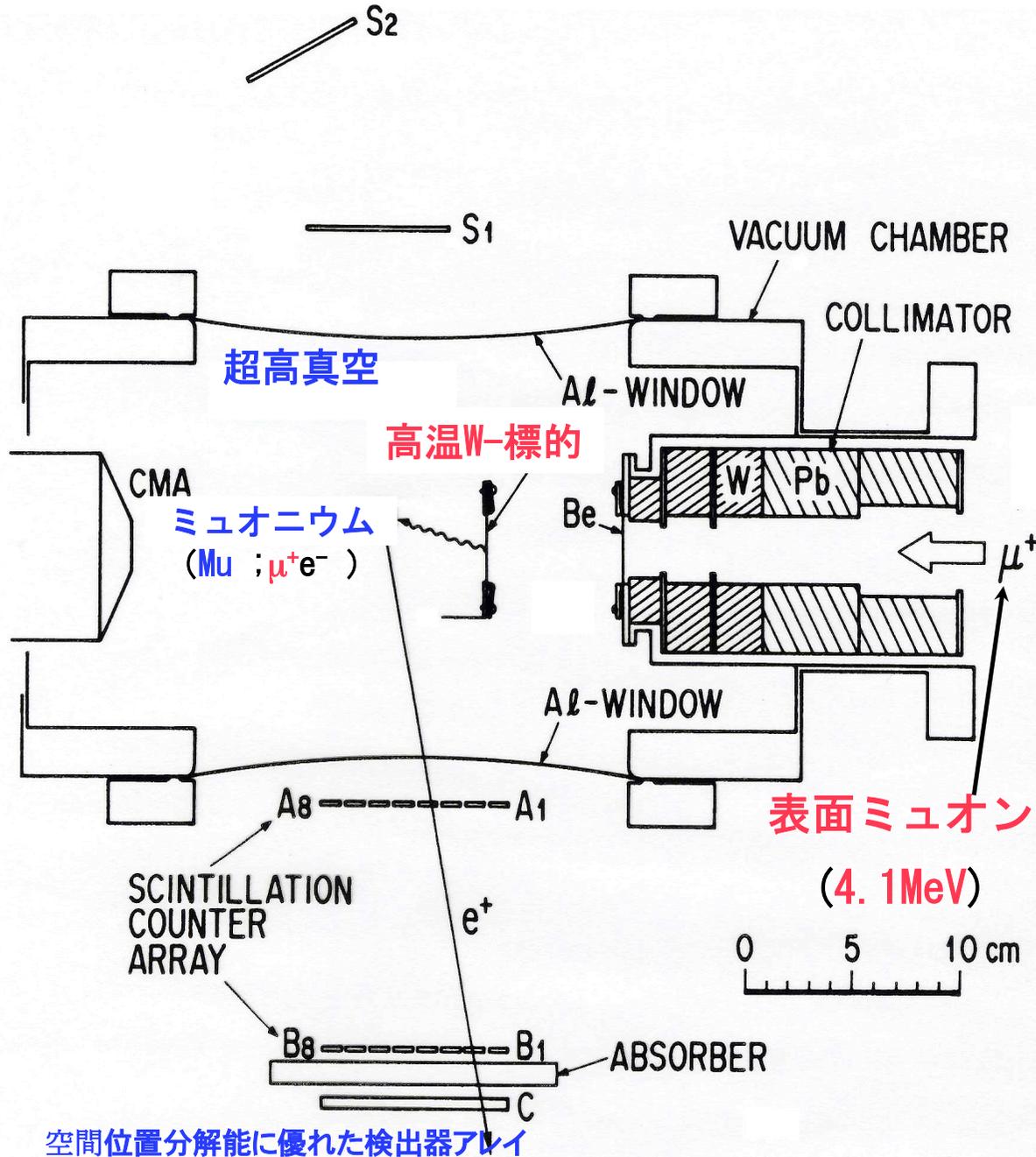
超低速ミュオンビームへの歩み

- STEP1: 真空中に於ける熱ミュオニウム ($\text{Mu}; \mu^+e^-$) の発生 (~1985)
by Mills, 今里、永嶺等 (W) & 松下、村田、永嶺等 (Pt)
- STEP2: 熱ミュオニウムの1s-2s励起による解離実験 (~1987)
(QED検証の為の精密実験)
by Chu, Mills, 久我, Yodh, 三宅、永嶺等
- STEP3: 超低速ミュオンプロジェクト@KEK (1990-1998)
by 三宅、下村、Birrer、永嶺等
- STEP4: 超低速ミュオンプロジェクト@理研RAL (1999~)
by 松田、Bakule、三宅、下村、池戸、牧村、永嶺 等
- STEP5: J-PARCに於ける大強度超低速ミュオン源 (2007~)

STEP1:真空中に於ける熱ミュオニウム ($\text{Mu}; \mu^+e^-$) の発生

by Mills (AT&T), 今里、永嶺等

~ 1985年

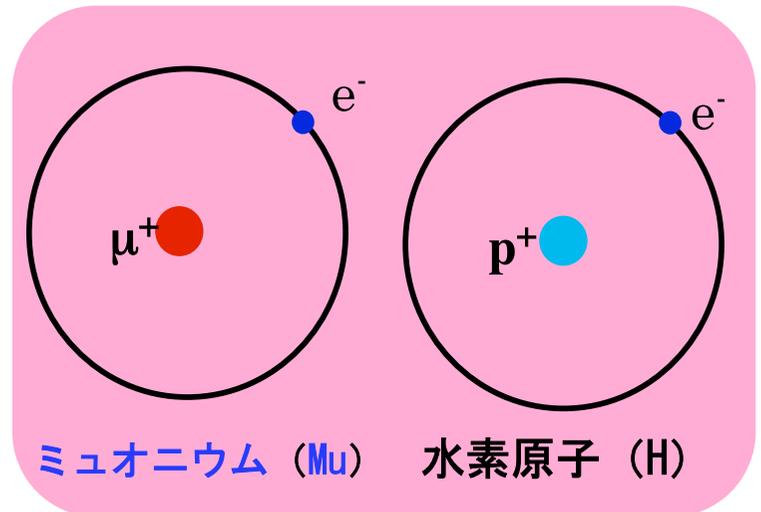


W タングステン

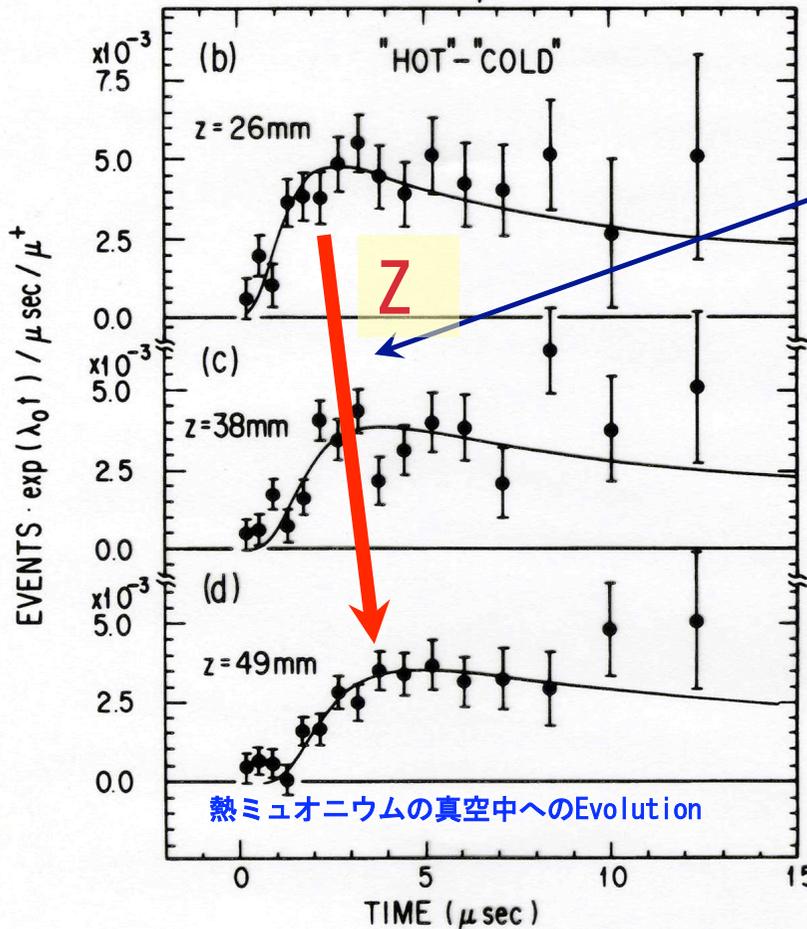
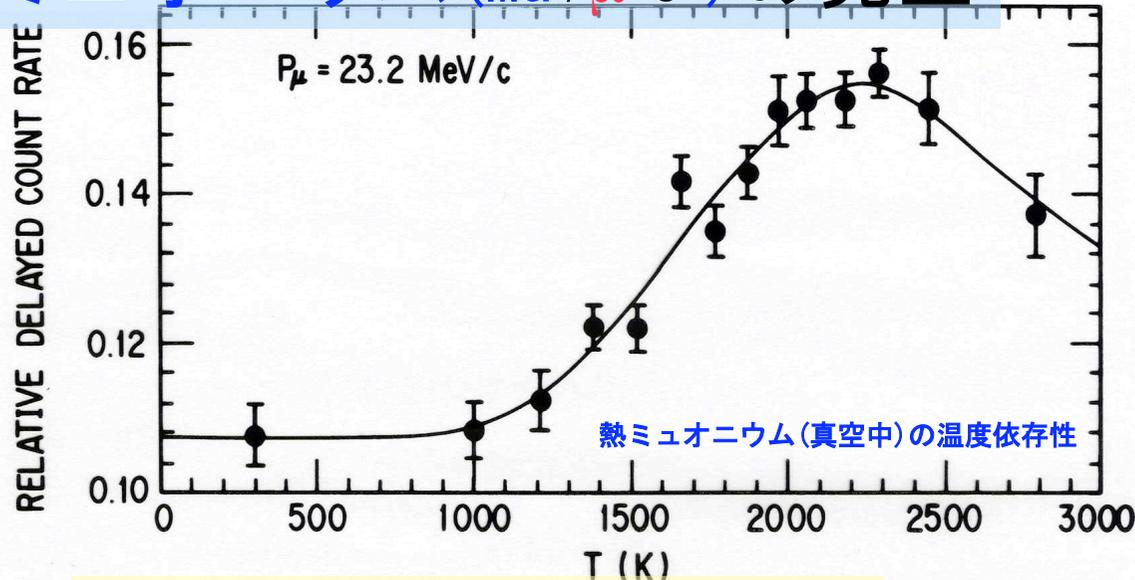
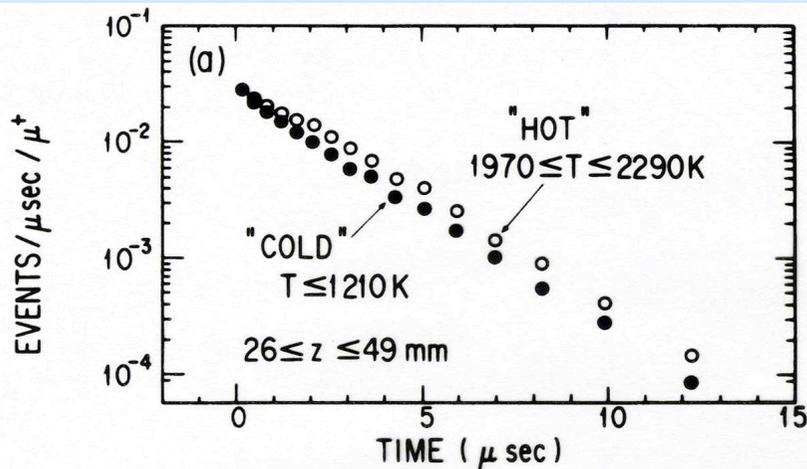
- ・Hの溶解エンタルピー大
- ・高温でバルク・真空中での拡散が速い。

DC カレント for 2300K

- ・中性のMuのみ前方真空中へ
- ・Not 電荷を持った μ^+ , Mu^-

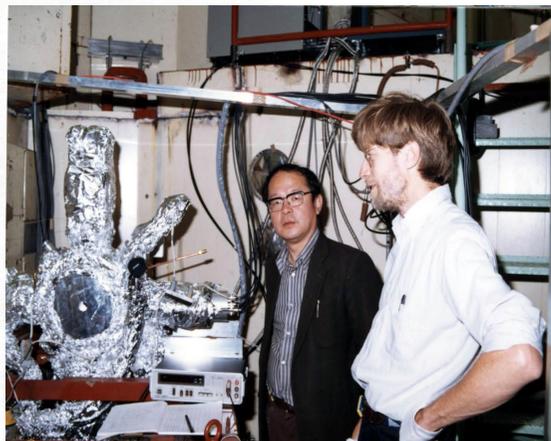


STEP1: 真空中に於ける熱ミュオニウム ($\text{Mu}; \mu^+e^-$) の発生



・Z : W標的からの距離が遠くなると熱Muの到達する時間がかかり、ピークが遅い方にずれていく。

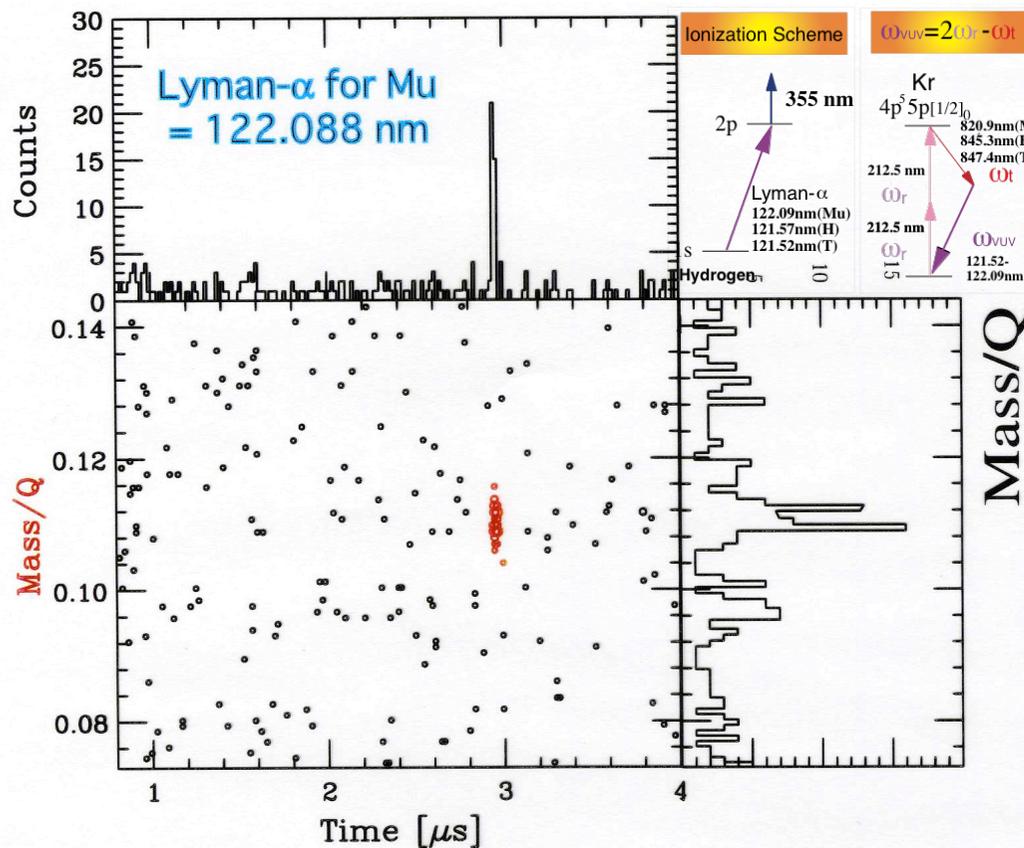
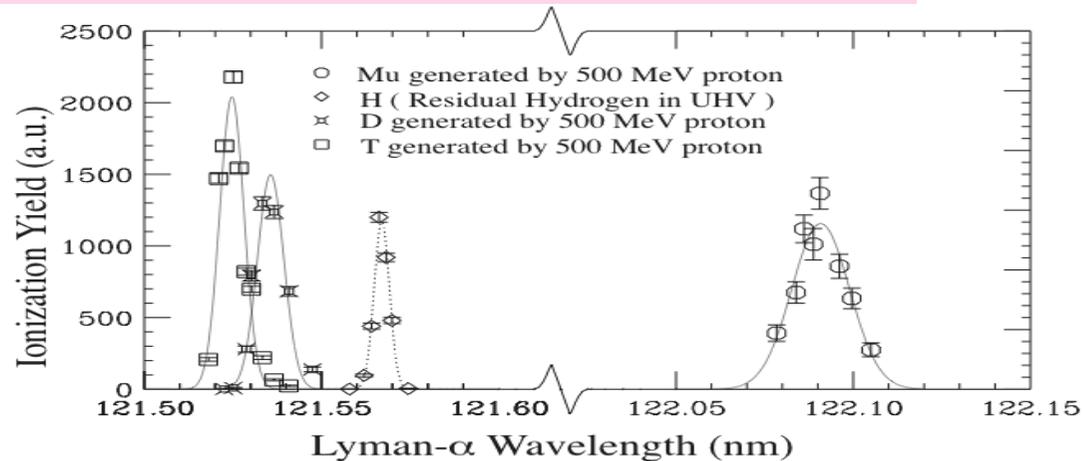
・W標的に止まった表面ミュオン
の内、4%が熱Muになって真空中へ。



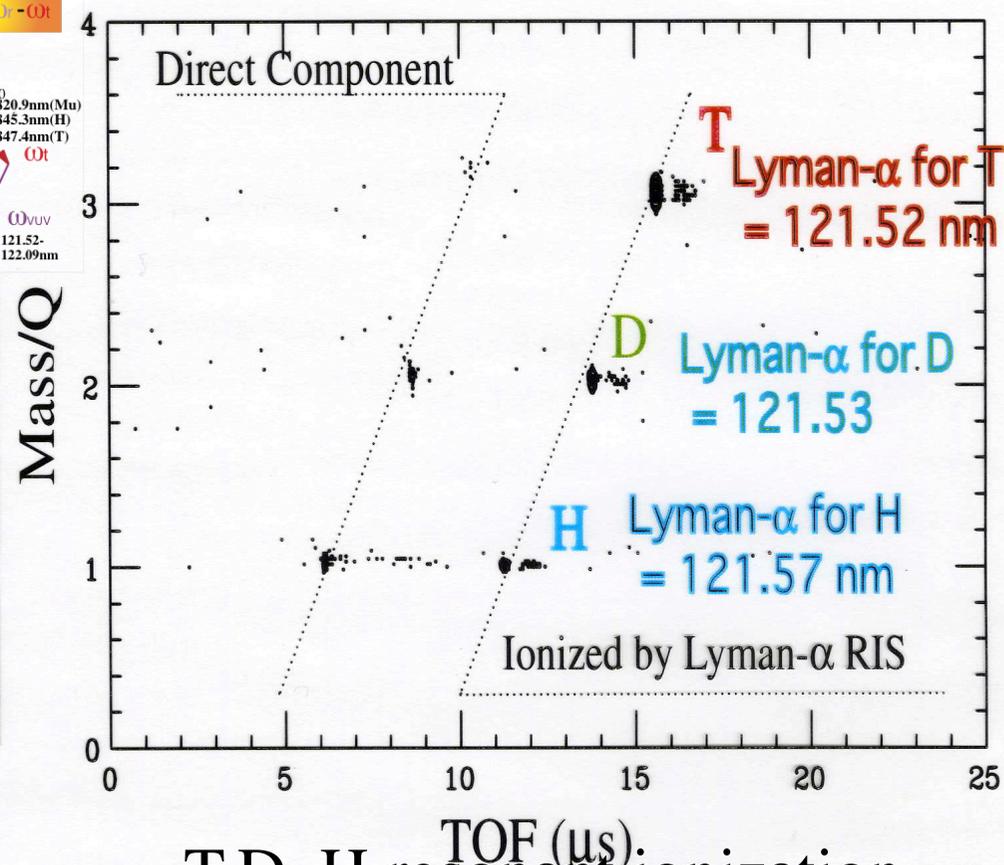
熱ミュオニウム ($\text{Mu}; \mu^+e^-$) 発生実験用チェンバーのベーク処理を見守る永嶺教授とA. Mills氏

STEP3: 超低速 μ^+ 生成の成功とT, D, H 検出と引出し

レーザー共鳴イオン化法による
超低速ミュオン生成方法の確立
がKEKでなされた。



Mu resonant ionization



T, D, H resonant ionization

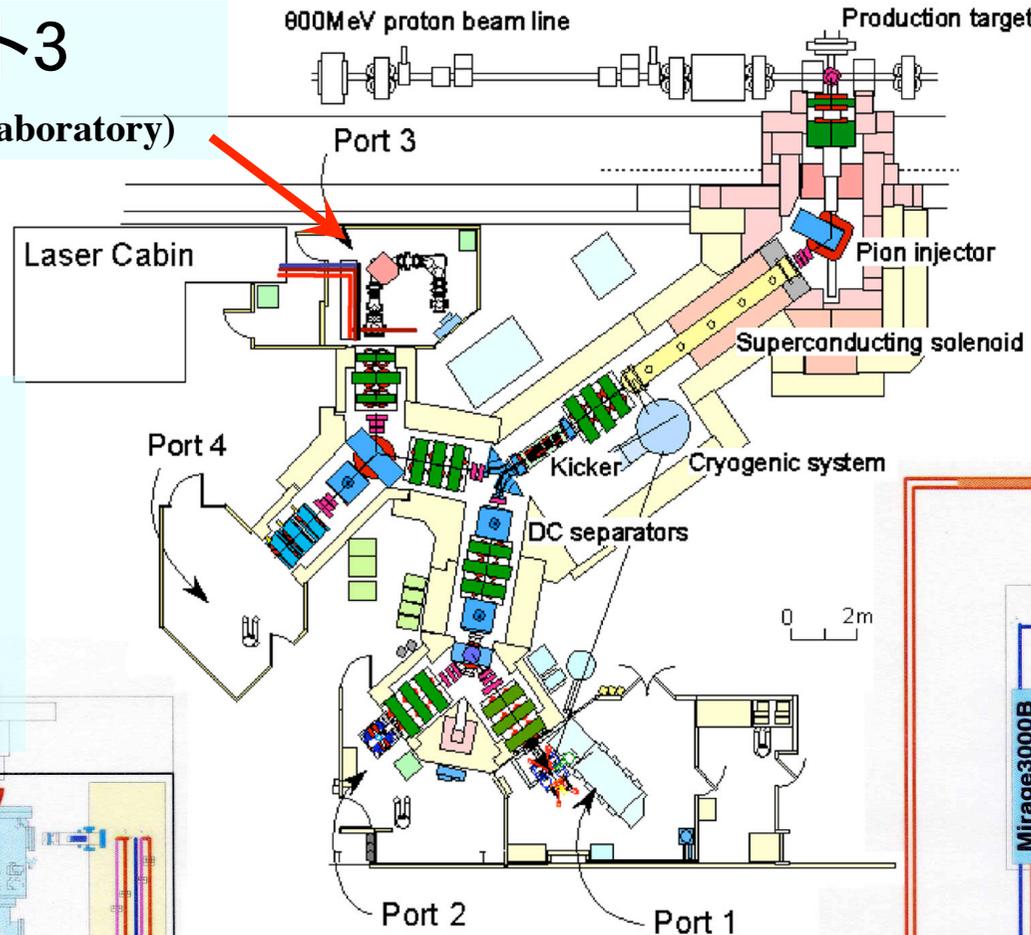
STEP4: 超低速ミュオンプロジェクト@理研RAL

by 松田、Bakule、三宅、下村、牧村、池戸、永嶺 等 1999年-

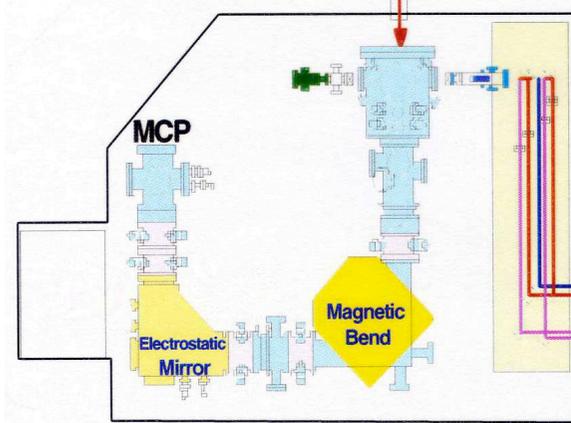
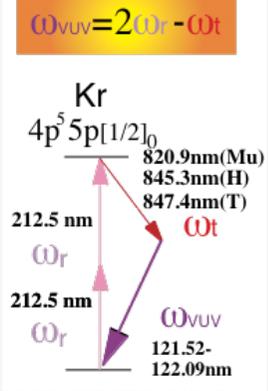
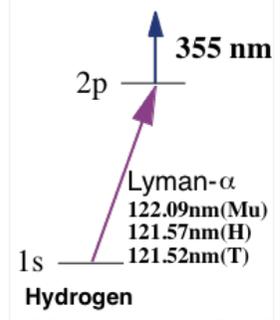
理研RALポート3

(Rutherford Appleton Laboratory)

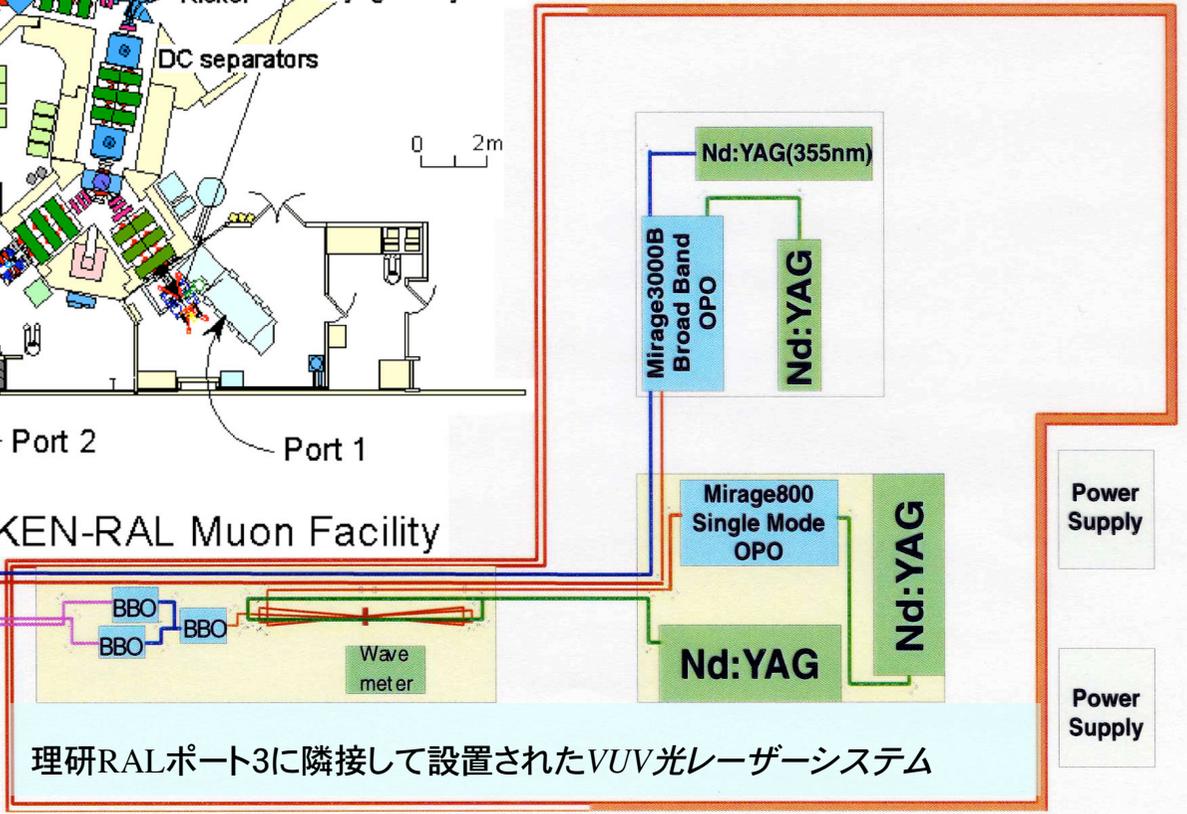
理研RALの大強度
パルス表面ミュオン
ビームとパルス
レーザーを同期さ
せる。



Ionization Scheme

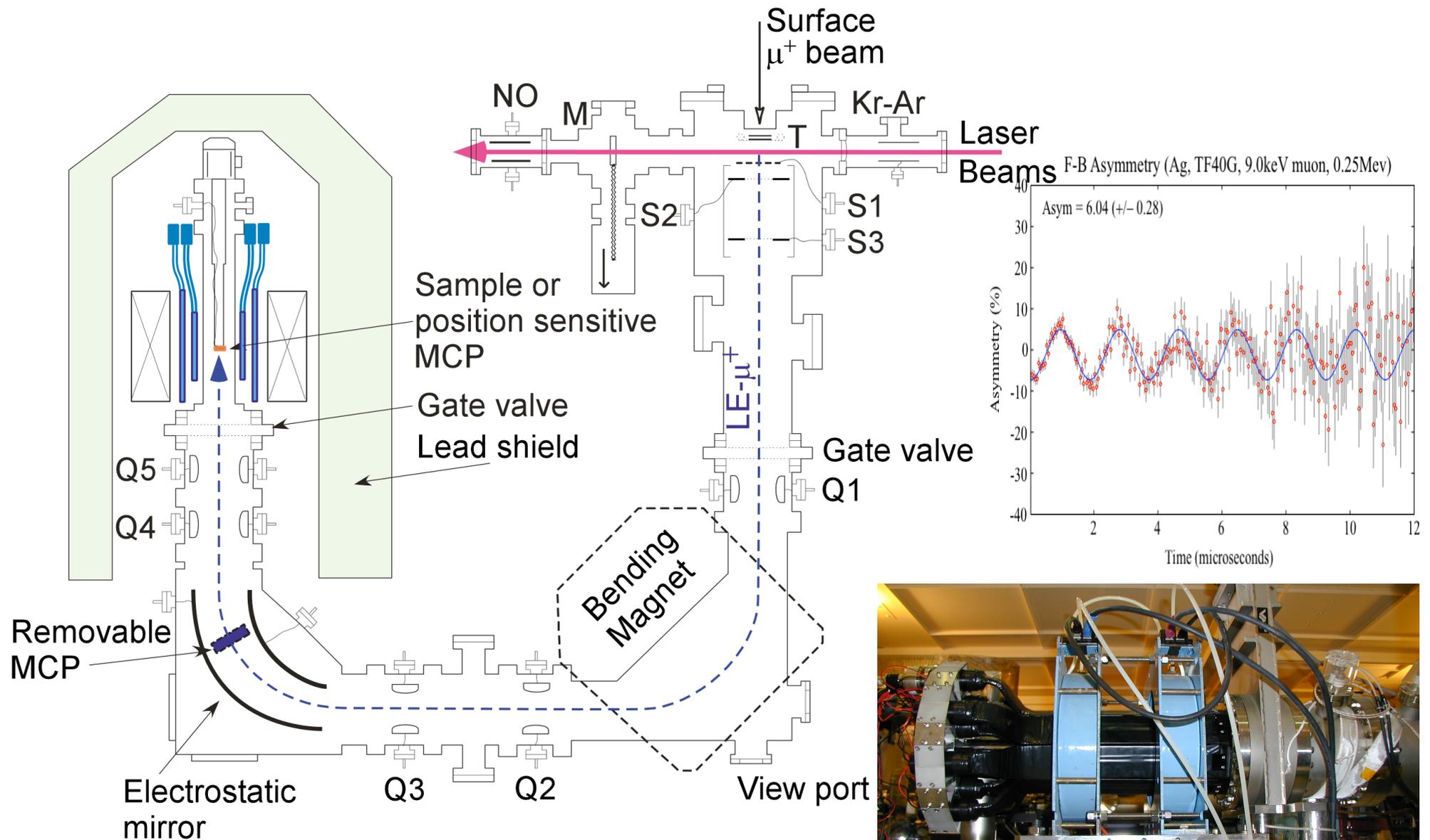


理研RALポート3に設置されたSlow Ion Optics



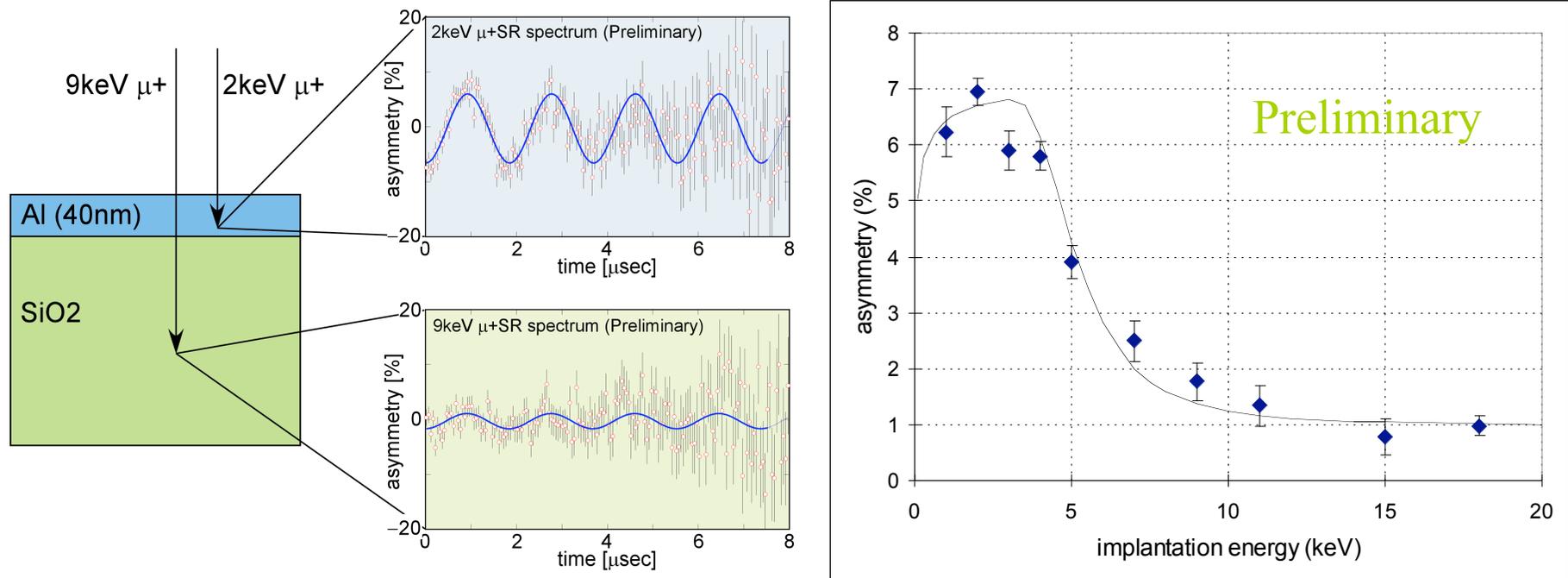
理研RALポート3に隣接して設置されたVUV光レーザーシステム

STEP4: 超低速ミュオン用 μ SR実験装置の製作、設置



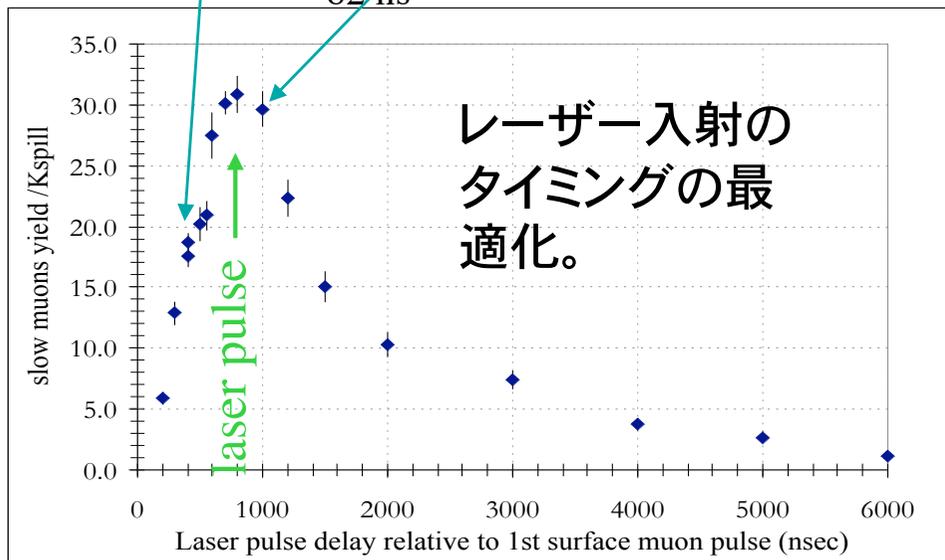
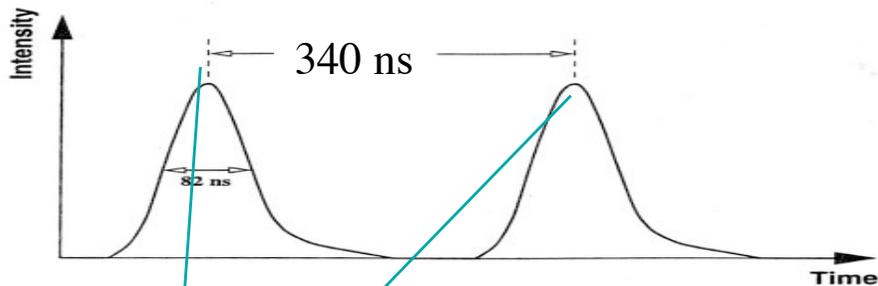
STEP4: 飛程が短い: 打ち込み深さの制御が可能

- 打ち込みエネルギーを変えて(1~18keV)、ミュオンの打ち込み深さを制御する事ができる。
 - 深さ方向の精度 2-5nm(現在)、目標1nm(J-PARC)
 - 表面・界面並びに積層薄膜へに応用が可能



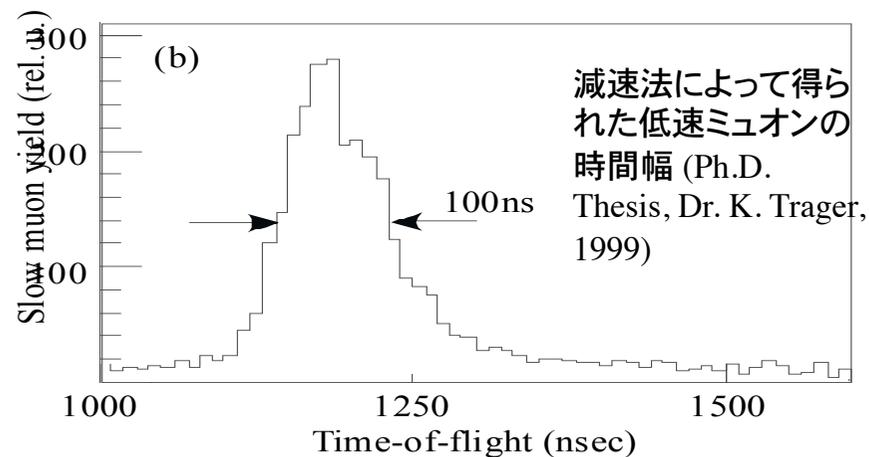
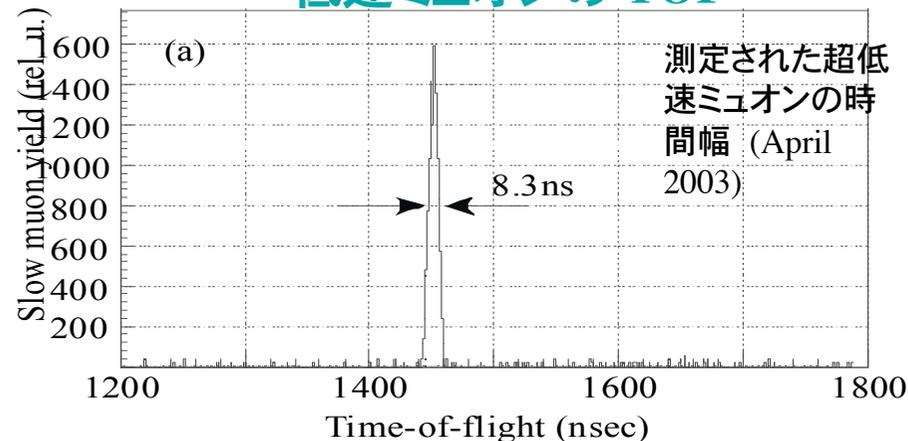
STEP4: 短い時間分解能 : レーザーのパルス幅による。

理研RALでのビームのバンチ構造



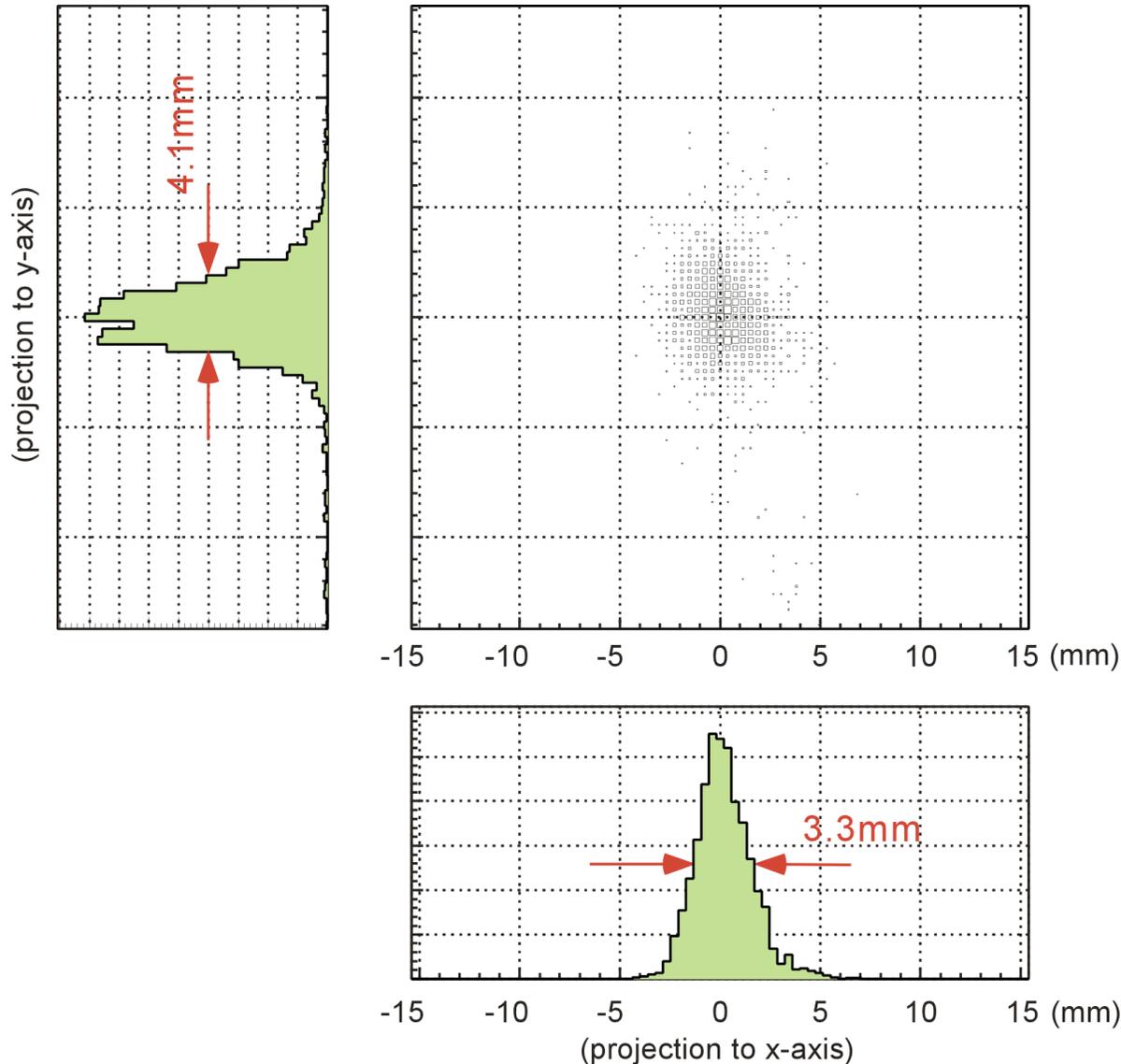
- **Mu**がWから蒸発してき、空間密度が最大になる800nsのタイミングでレーザーを入射する。
- **2バンチ構造**明確にデータから読みとれる。

低速ミュオンの TOF



- レーザー共鳴イオン化法により得られる超低速ミュオンの時間幅は、レーザーのパルス幅(ns)により決定され、現在**8.3ns**。**J-PARC**では、**ps**を目指す。
- 元々のミュオンの時間幅**100ns**より、遙かに短くできる。

STEP4: ビームを収束できる : 試料位置でのサイズ



- 位置分解能を有するMCPによるプロファイルの測定

- エミッタンスに優れた(0.2eV)ミュオンを9.0keVに加速

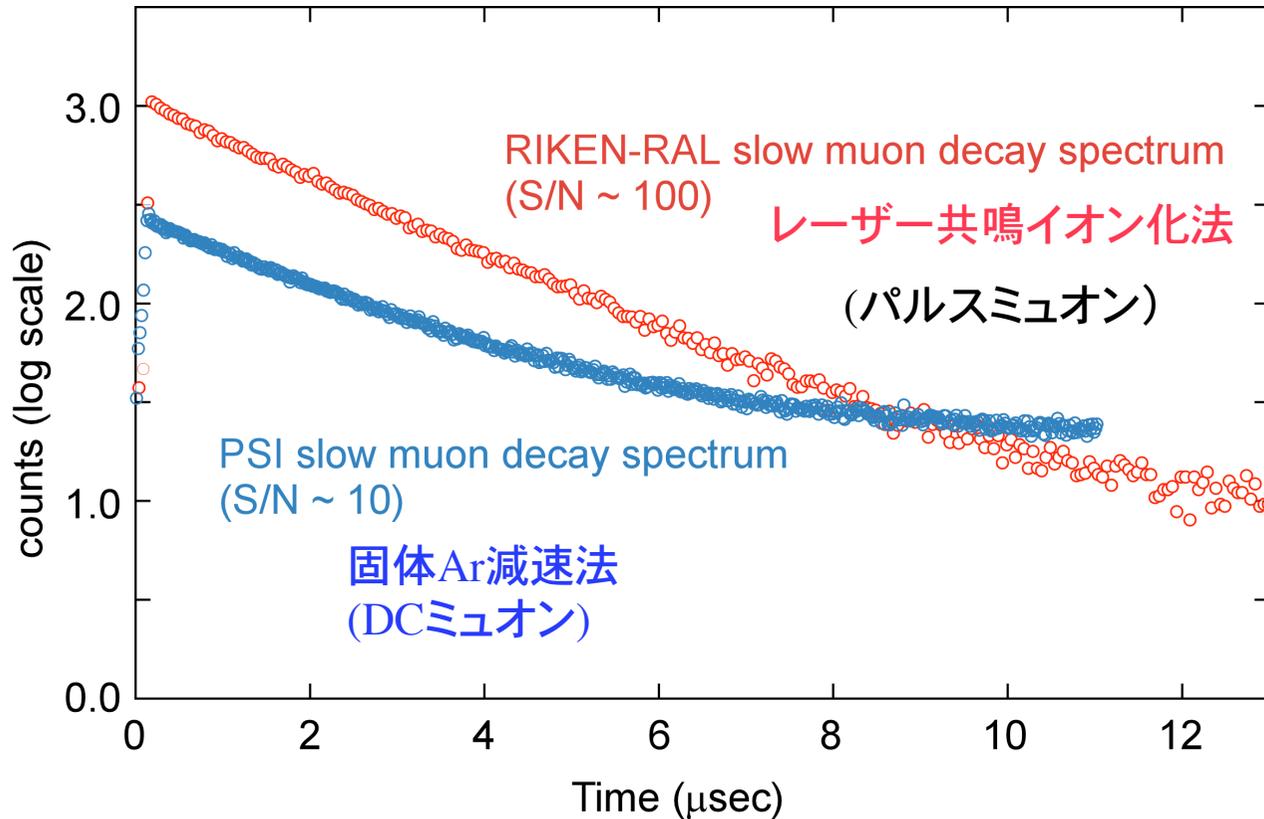
- 4.1mm (x-axis)

- 3.3mm (y-axis)

- 元々の表面ミュオンのビームサイズは

- 40mm x 30mm (4.1MeV)

STEP4: *BG. が小さい*: レーザー共鳴イオン化法の特徴



- red points are taken at RIKEN-RAL muon facility on March 2005.
- blue points are an example of decay spectrum taken at PSI (by Dr. Francis Pratt)

- レーザー共鳴イオン化法による超低速ミュオンビームは、パルスミュオン源の特徴である**瞬時強度が上がる**事により、バックグラウンドが小さい。
 - lower background.
- 減速法を用いているPSIでは、DCミュオンでは不可避の中性子のバックグラウンド、並びにトリガー信号を創るときのBGが大きい。

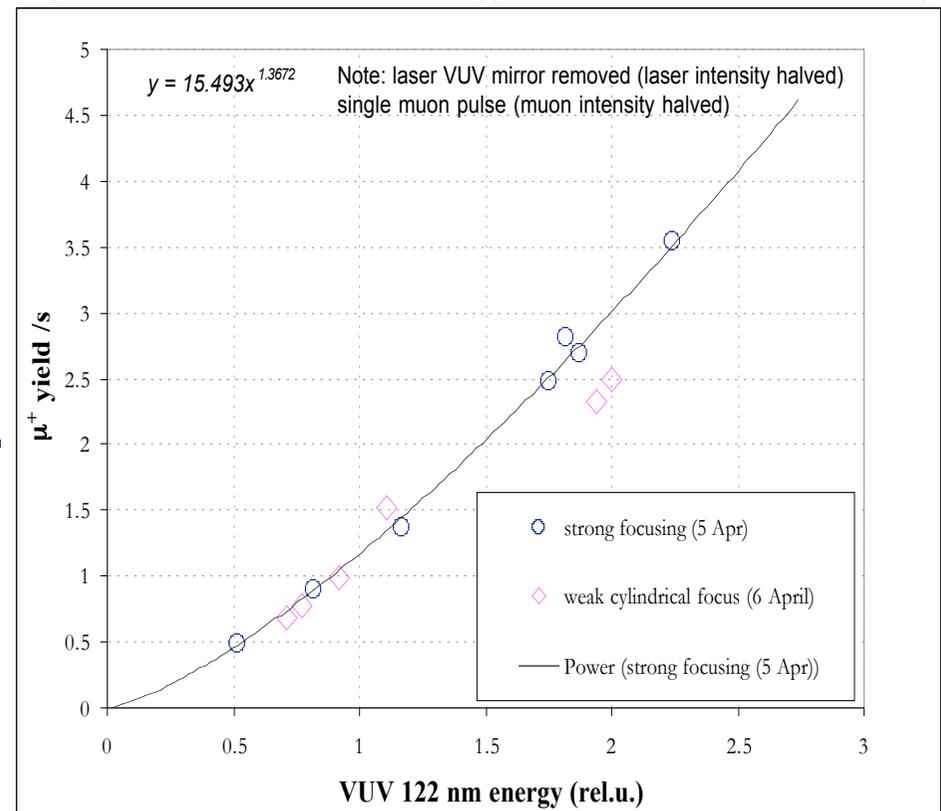
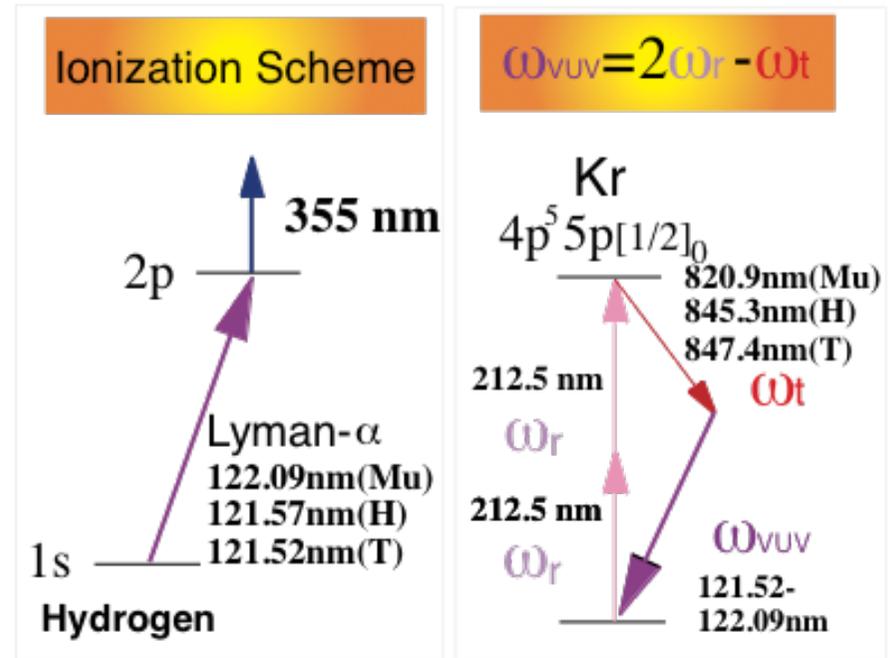
STEP4: 超低速ミュオンの数

- In 2004, 5 個/秒 @理研-RAL
- In 2005, 20 個/秒 @理研-RAL
- レーザーの向上
 - 2p-unbound 遷移; 飽和せず
 - 飽和強度 1s-2p transition
 - 100 $\mu\text{J}/\text{p}/\text{cm}^2$ 必要!
 - 現在 $\sim 1 \mu\text{J}/\text{p}/\text{cm}^2$
- 目標、100 個/秒 @理研-RAL
 - Laser(25Hz), muon(50 Hz)

@ J-PARC 25Hz for Laser and muon --> factor 2

圧倒的な大強度パルスミュオン源

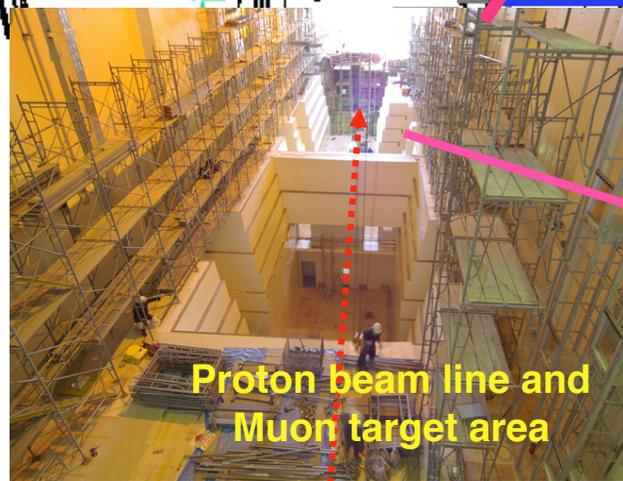
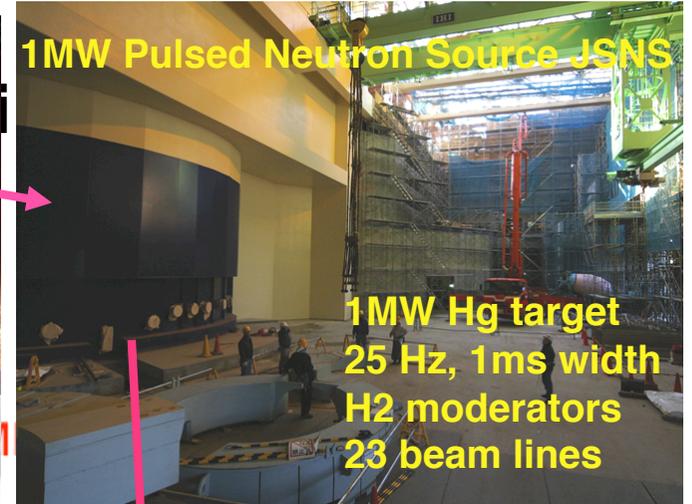
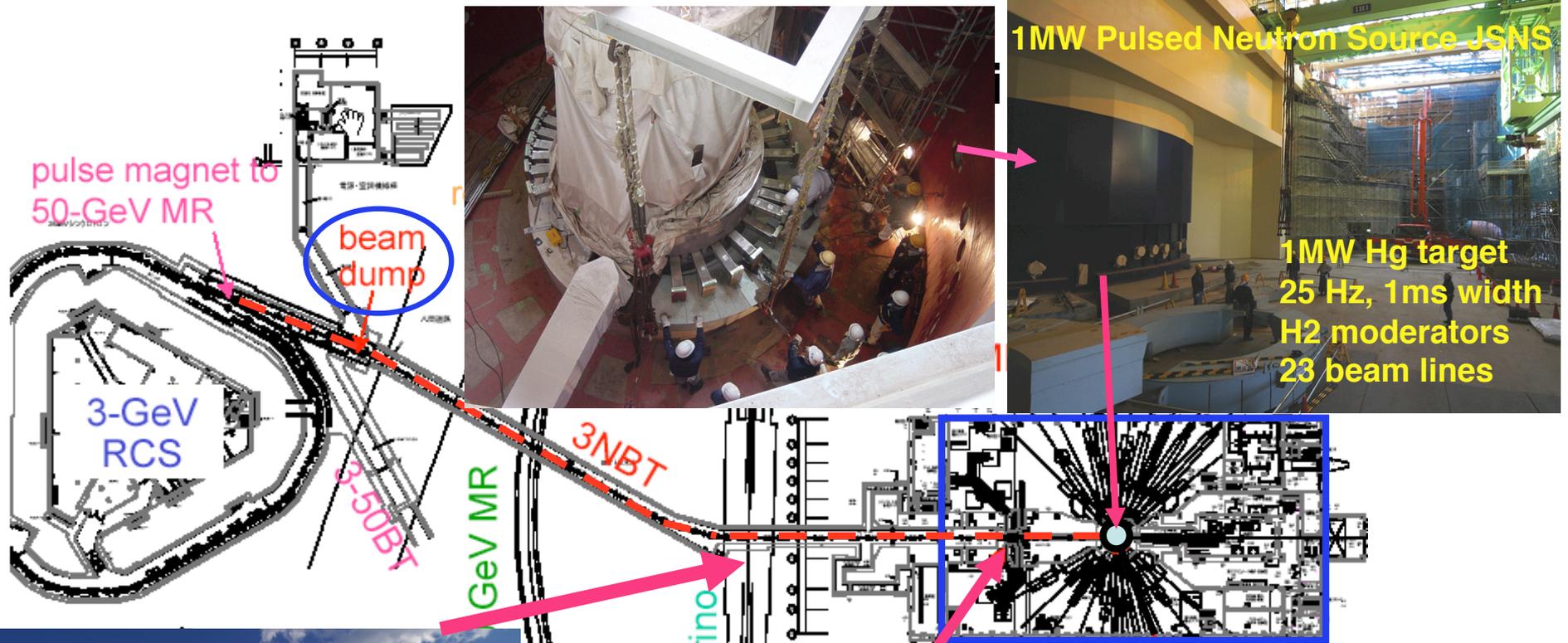
J-PARC MUSE



STEP5: J-PARCに於ける大強度超低速ミュオン源

Recent MLF construction progresses

From Y. Ikeda



STEP5: J-PARCに於ける大強度超低速ミュオン源

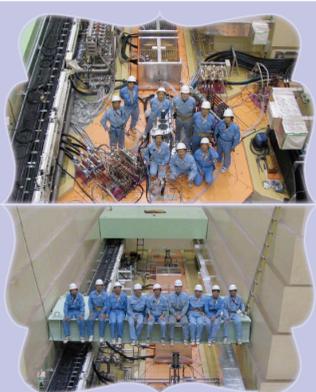
DAY 1 (2008. 9.26)

Muon section, Materials and Life Science Division,

J-PARC center

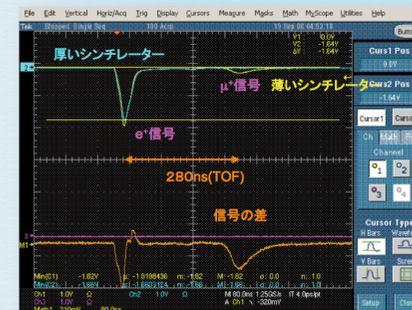
ミュオンビームの発生に成功

平成20年9月26日12時10分
光速近くまで加速した陽子ビームを黒鉛(炭素)製の標的に入射して中間子を造り出すことにより、ミュオンのビームを発生させることに成功しました。

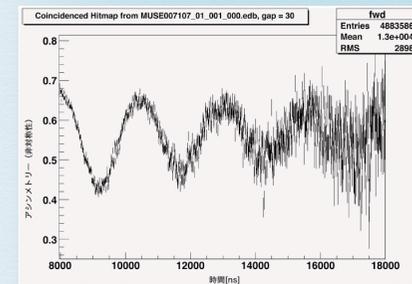


ミュオンビームにより得られたデータ:

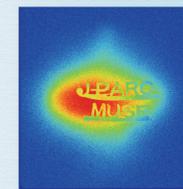
関係者の目でミュオンの時間スペクトルが時々刻々変わっていく様子がディスプレイ上に表示され、磁場中でミュオンスピンの回転していることを確認し、さらにビームラインパラメーター調整、データ収集システムの調整検査を続けて行い、図に示されるようなビームプロファイルを得ました。



9月19日16時52分標的より出た二次粒子

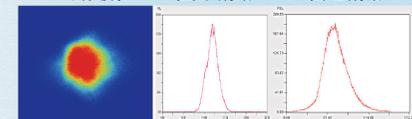


A1をサンプルとした μ SRスペクトル



ミュオンプロファイルのIP像

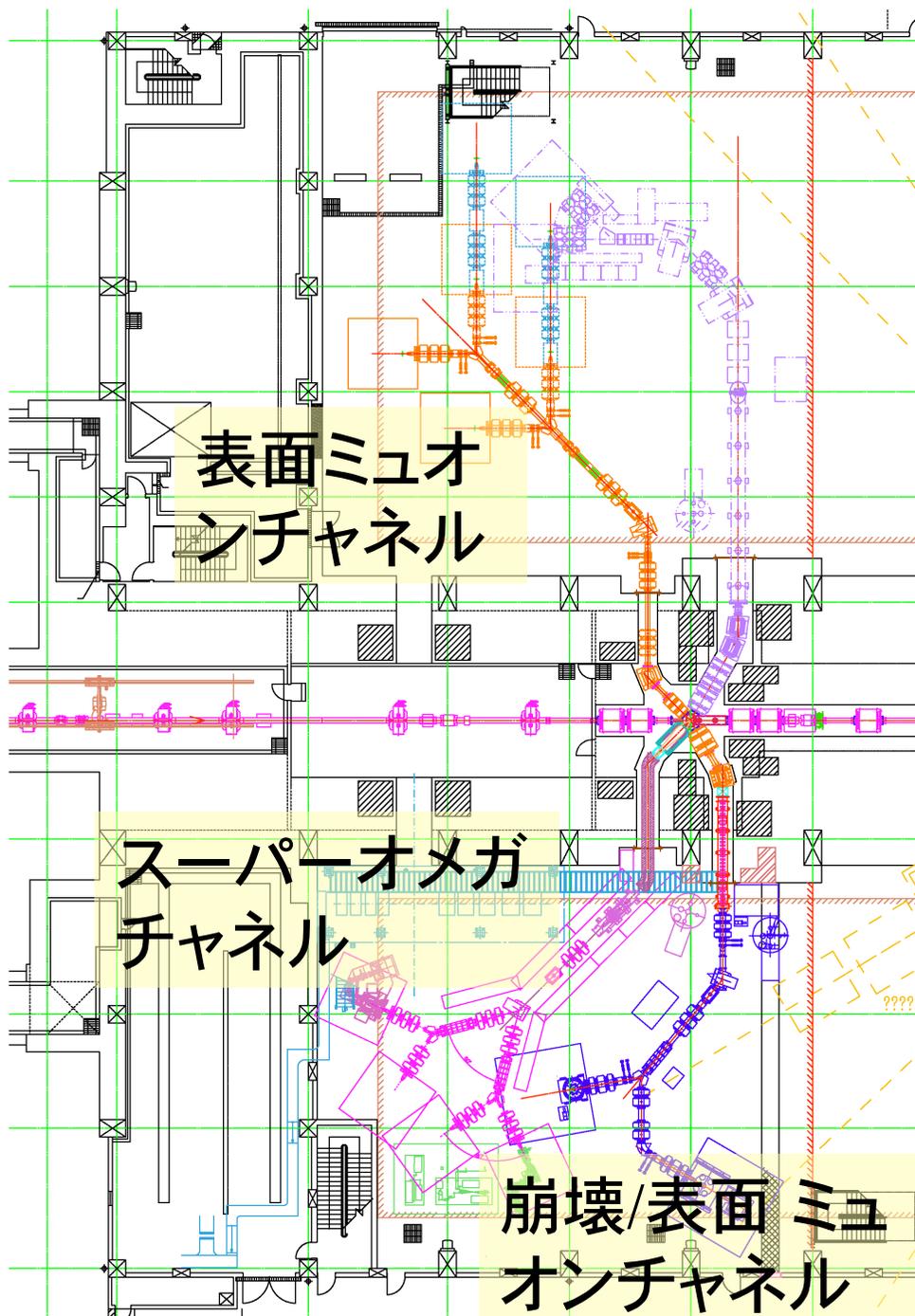
二次元像 上下射影 左右射影



RUN19終了時まで得られたビーム像



J-PARC MUSEに於けるミュオンビーム



1) 崩壊/表面ミュオンチャンネル(PS 移行経費による設置)

	表面ミュオン (μ^+)	崩壊ミュオン (μ^+, μ^-)
ビームエネルギー	4.1MeV	5-50 MeV
打ち込み深さ	~0.2 mm	1 mm - ~ cm
エネルギー広がり	~15%	~15%
時間幅 (パルス幅)	~100 ns	~100 ns
ビームサイズ	30 mm x 40 mm	70 mm x 70 mm
強度	$3 \times 10^7/s$	$10^{6-7}/s$
実験ポート数	2	2

2) 表面ミュオンチャンネル(将来計画)

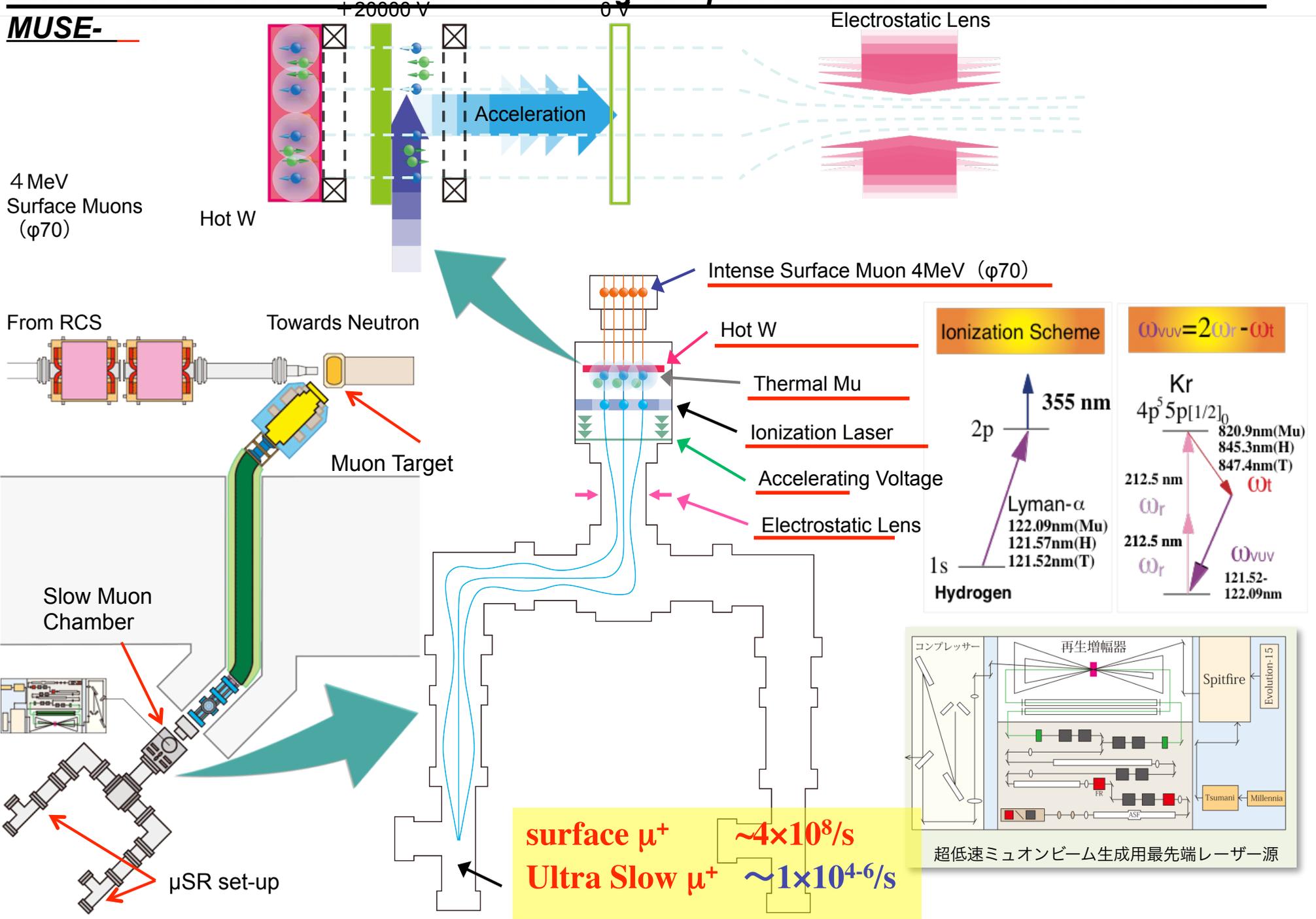
	Surface Muon (μ^+)
ビームエネルギー	4.1MeV
打ち込み深さ	~0.2 mm
エネルギー広がり	~15%
時間幅 (パルス幅)	~100 ns
ビームサイズ	30 mm x 40 mm
強度	$10^{6-7}/s$
実験ポート数	4

3) スーパーオメガチャンネル (将来計画)

	超低速ミュオン (μ^+)	クラウドミュオン (μ^-)
ビームエネルギー	0-30 keV	4 MeV
打ち込み深さ	0 nm - 200 nm	?
エネルギー広がり	$\ll 1\%$?
時間幅 (パルス幅)	8.3 ns(現在) --> ps	~100 ns
ビームサイズ	3x4mm(現在) --> 1 ϕ	?
強度	$2-5 \times 10^5/s$	$10^5/s$
実験ポート数	2	2

Ultra Slow Muon Beam- Utilizing Unique features of Pulsed Muons at J-PARC

MUSE-



STEP5;スーパーオメガミュオンチャネル

- 表面ミュオン(μ^+) と負ミュオン(μ^-)を同時に捕獲
- 世界最高強度の パルスミュオン源 ($\sim 4 \times 10^8 \mu^+/\text{s}$ 、 $\sim 1 \times 10^7 \mu^-/\text{s}$)

捕獲用常伝導ソレノイド(MIC)

- $\pm 20^\circ$ の出射角を持つミュオンを捕獲
- 設置済み

輸送用超伝導湾曲ソレノイド

- KEK低温Gと共同開発
- 実験エリアへの放射線の軽減
- 正負ミュオンの同時輸送
- 直線部1つと 45° の湾曲部 (7分割)2つ
- GM冷凍機 5台で冷却

軸集束超伝導ソレノイド

- 輸送されたミュオンを実験標的に集束

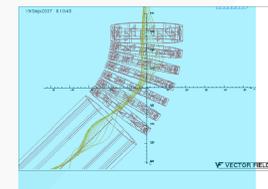
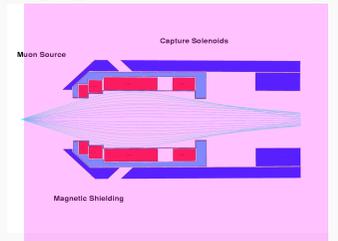
軸収束系へ

直線部
内径300 mm

湾曲ソレノイド

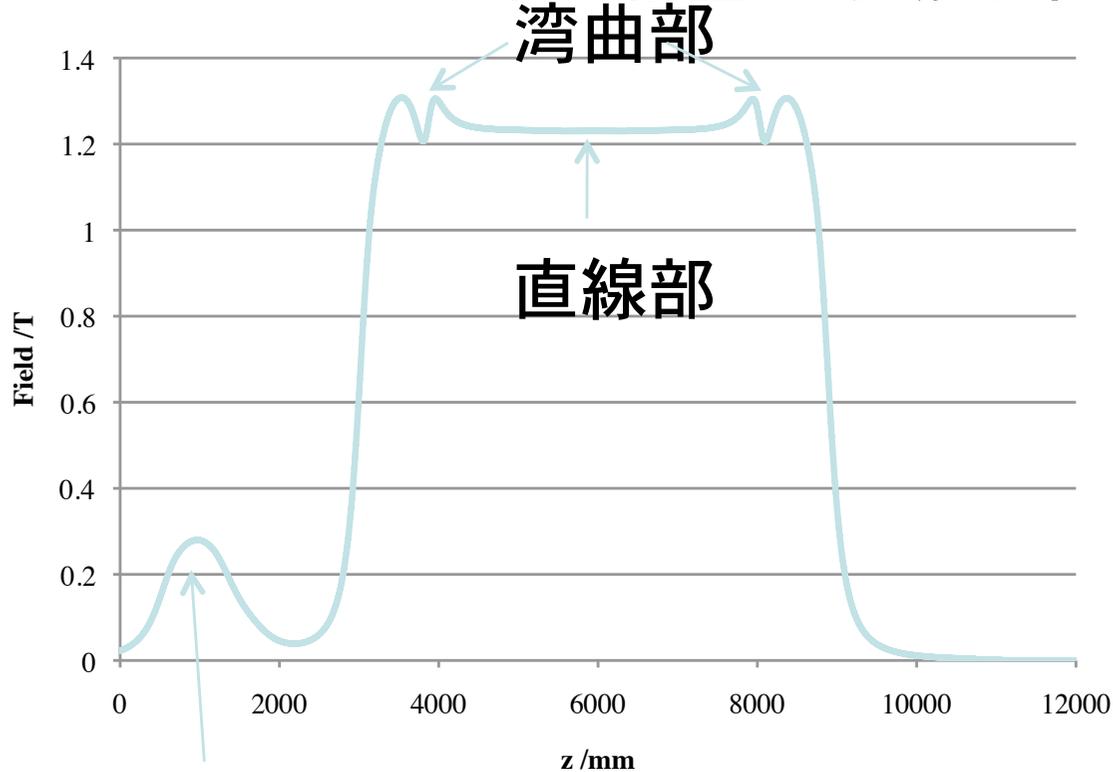
湾曲部
内径360 mm

捕獲ソレノイド



湾曲ソレノイドの磁場分布

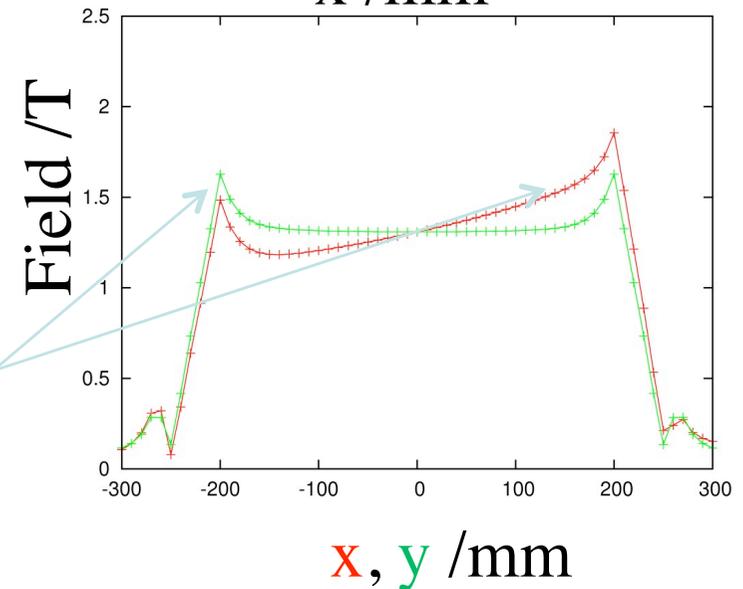
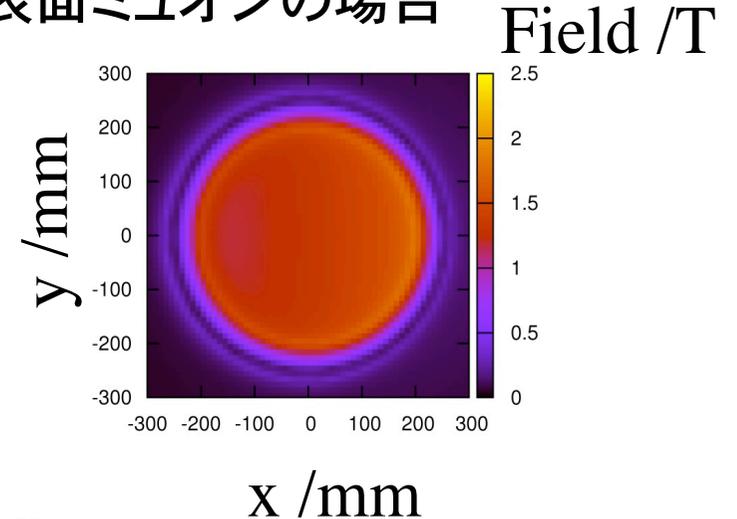
コイル中心軸上の磁場分布



捕獲ソレノイド

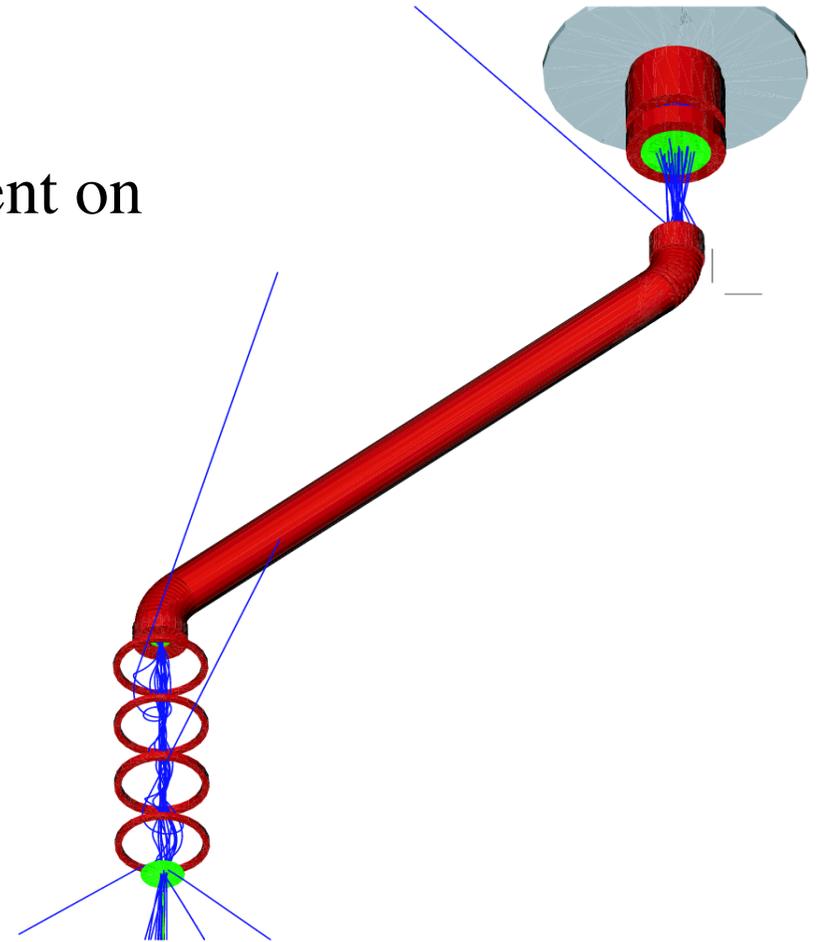
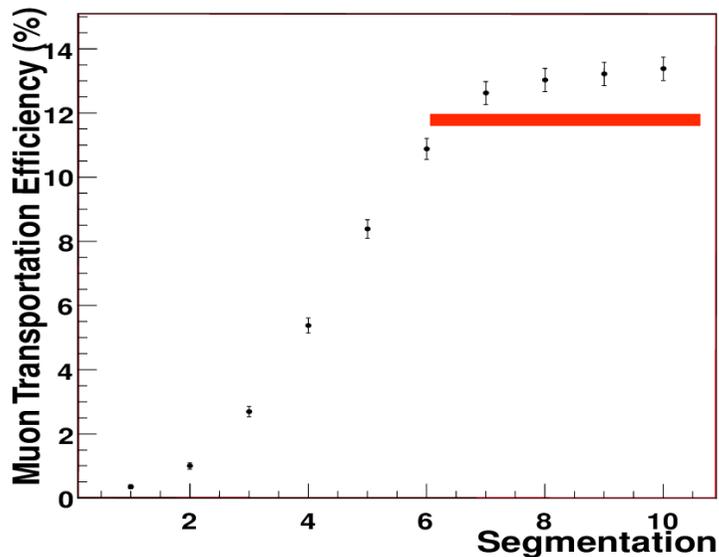
30 MeV/cの表面正ミュオンを輸送する場合の
コイル上ピーク磁場は1.85 T。
50 MeV/c以下のクラウドミュオンを輸送する
場合は約3Tとなる。

湾曲部コイル中心位置 断面の磁場分布 表面ミュオンの場合



- Transport efficiency calculated through GEANT4 (30 MeV/c)
 - Most beamloss occurs at bend – dependent on segmentation
- Efficiency stabilizes ~7 segments

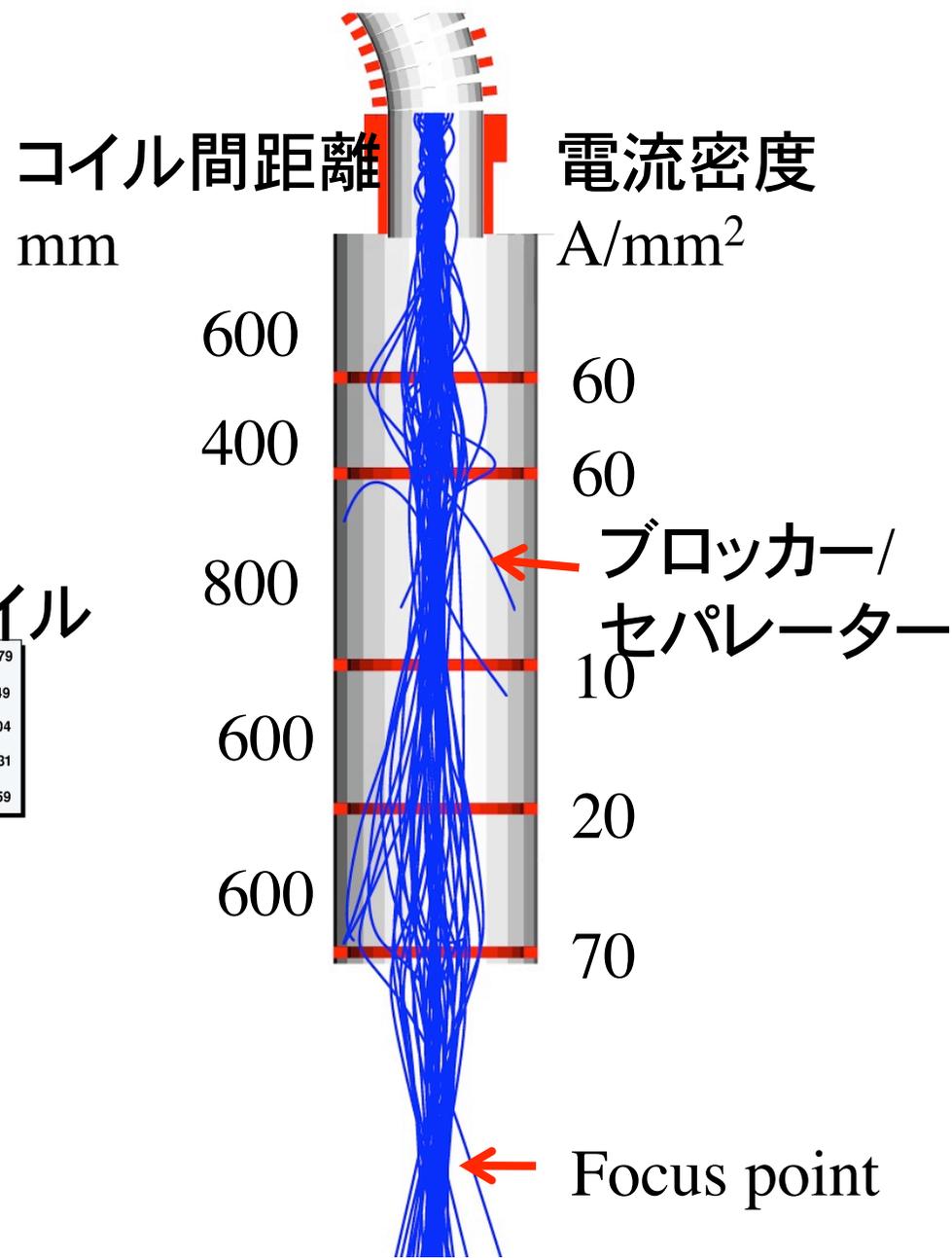
Rate vs Segmentation for constant coil width



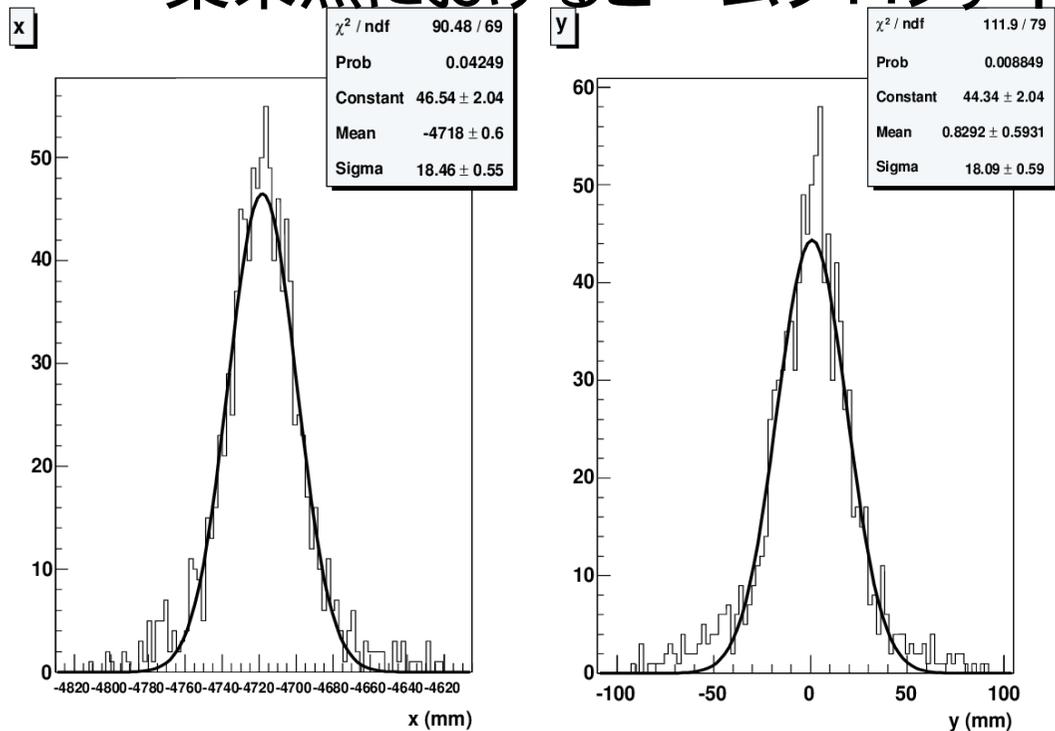
Use 7 segments with higher current/larger coil width

- ・湾曲ソレノイド
捕獲したミュオンの80%を
トランスポート
- ・ビーム集束 (5コイル系)
超伝導ソレノイド
内径740 x 幅48mm 5個
FWHM 36mm
焦点距離 460 mm

軸集束ソレノイド



集束点におけるビームプロファイル



STEP5: J-PARCで期待される超低速ミュオンの強度

J-PARCで期待される収率;

1) 繰り返し周波数 25 Hz (At RIKEN-RAL 50 Hz)
factor **2 倍**

2) 表面ミュオンの数

$$4.0 \times 10^8 /s / 1.2 \times 10^6 /s (\text{RIKEN-RAL}) = \mathbf{333 \text{ 倍}}$$

3) レーザー開発(ライマン- α レーザー)

$$100 \mu\text{J}/p / 1 \mu\text{J}/p (\text{RIKEN-RAL}) = \mathbf{100 \text{ 倍}}$$

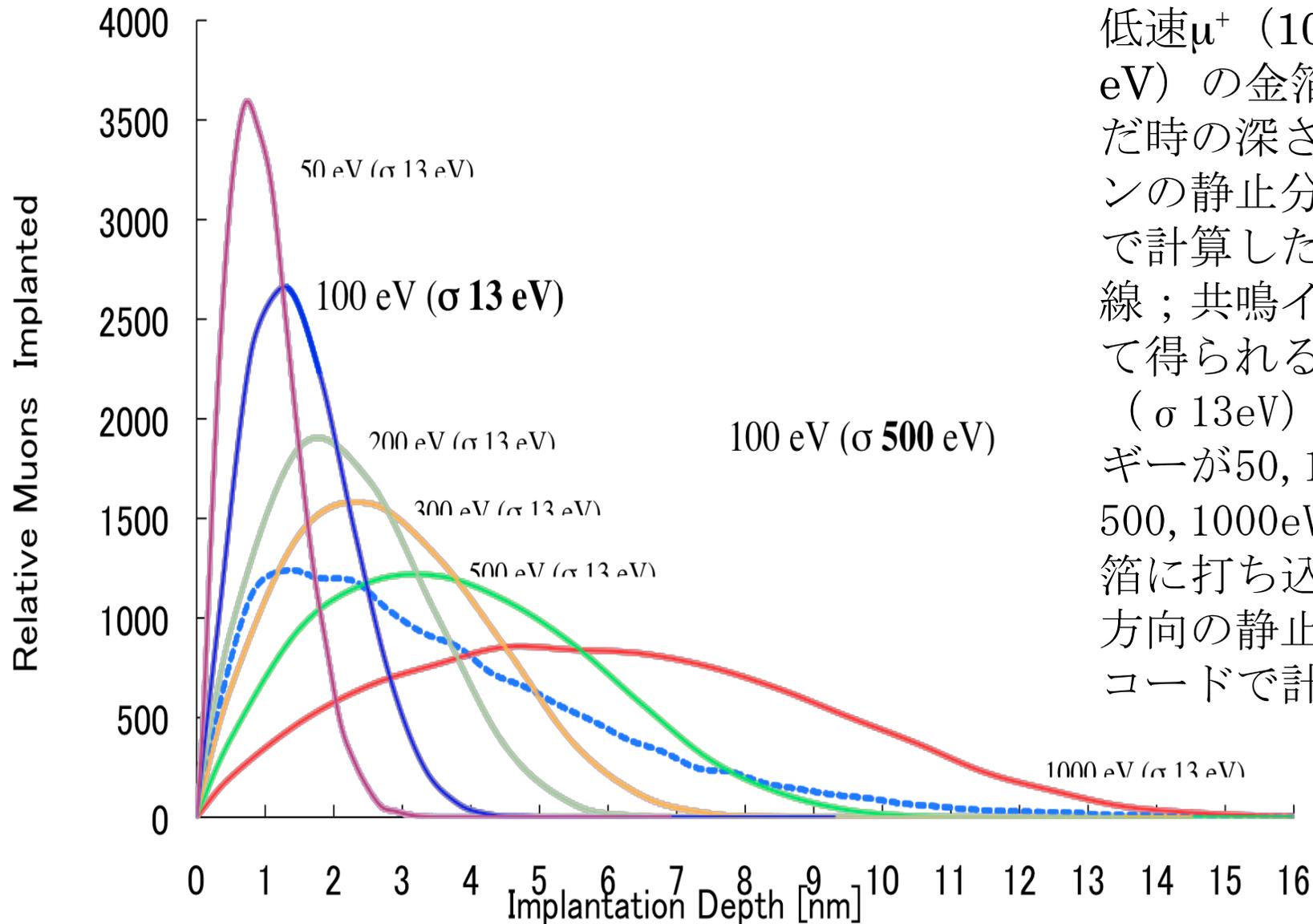
スーパーオメガチャンネルで期待される超低速ミュオンの収率

$$20 /s \times 2 \times 333 \times 100 = 1.3 \times 10^6 /s \text{ (} 10^4 /s \text{ without Laser Developments)}$$

*Riken-RAL Slow
Muon Intensity*

*Maximum
J-PARC Slow Muon Intensity*

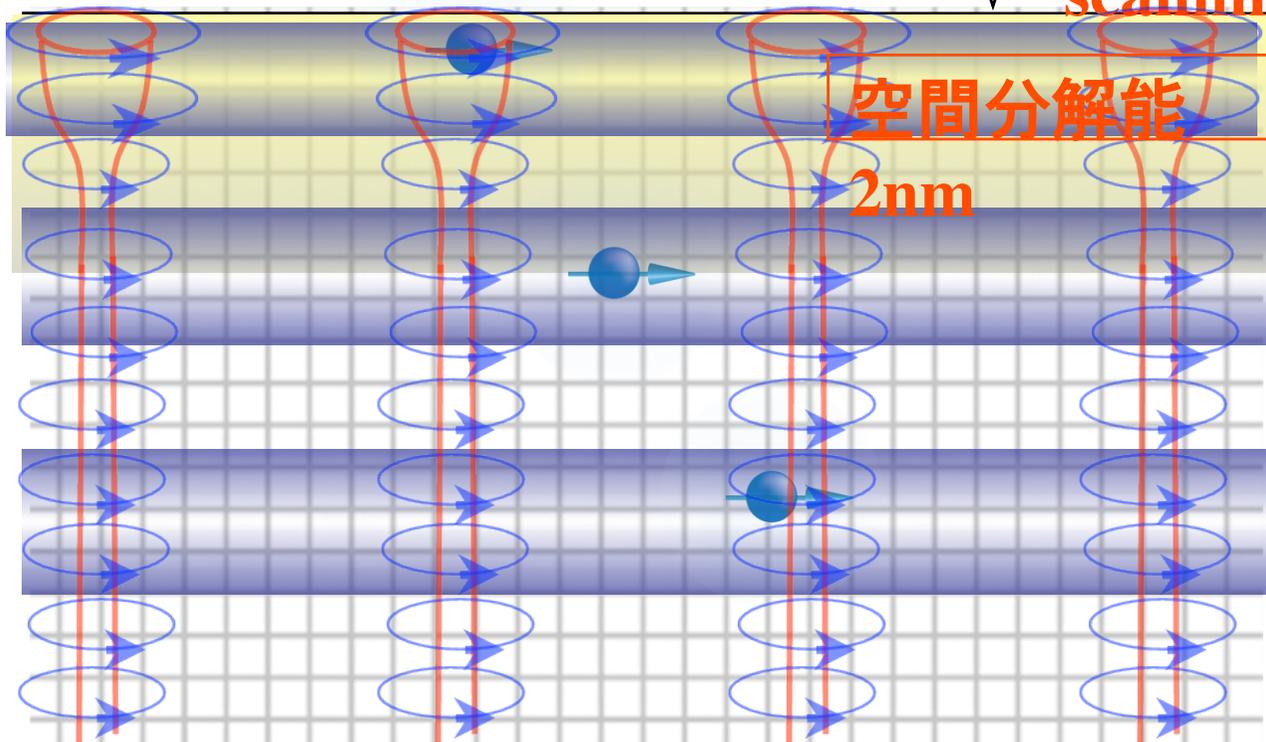
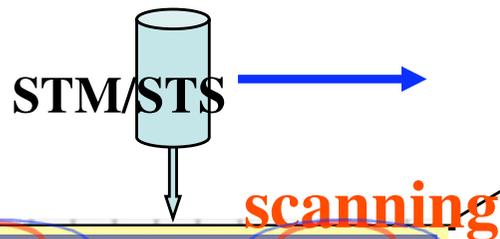
Stopping Range of Ultra Slow μ^+



破線：減速法で得られる低速 μ^+ (100 eV, σ 500 eV) の金箔に打ち込んだ時の深さ方向のミュオンの静止分布TRIMコードで計算した計算結果。実線；共鳴イオン化によって得られる超低速 μ^+ (σ 13eV) の入射エネルギーが50, 100, 200, 300, 500, 1000eVの場合の、金箔に打ち込んだ時の深さ方向の静止分布をTRIMコードで計算した結果。

高温超伝導体発現機構の解明：渦糸芯の電子状態

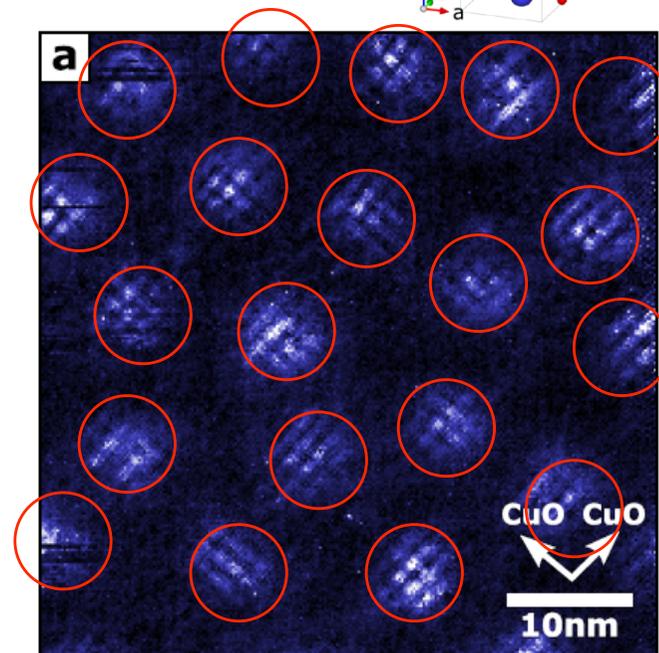
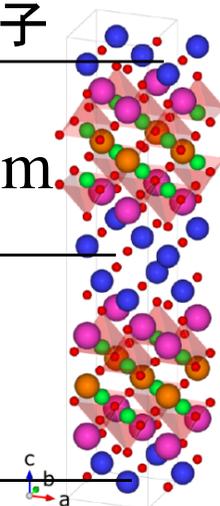
A02-4



単位格子

1.54nm

3.07nm



0.03 0.28 [nS]

K. Matsuba et al:

JPSJ 76 (2007) 063704

$H_{c2} = 200\text{T} \rightarrow \xi = 1.3\text{nm}$ (Coherence Length)

高空間分解能走査トンネル分光測定
(14.5T、4.2K) 50pm空間分解能 \rightarrow

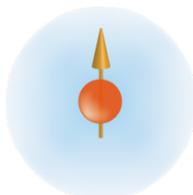
$\xi = 2.5\text{-}3\text{nm} \rightarrow H_{c2} = 40\text{-}50\text{T} ?$

超低速ミュオン: 打ち込み深さを制御可能 (2nm~200nm)

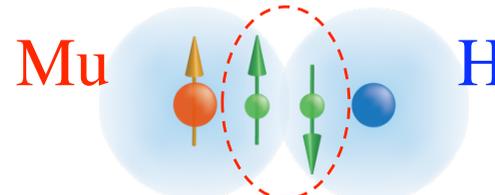
ラーマースピン回転により正ミュオン(水素)の状態がわかる。



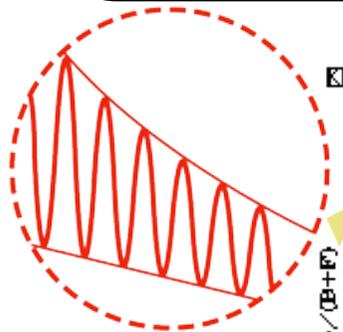
Mu (H相当)
1.39MHz/Gで
ラーマースピン回転



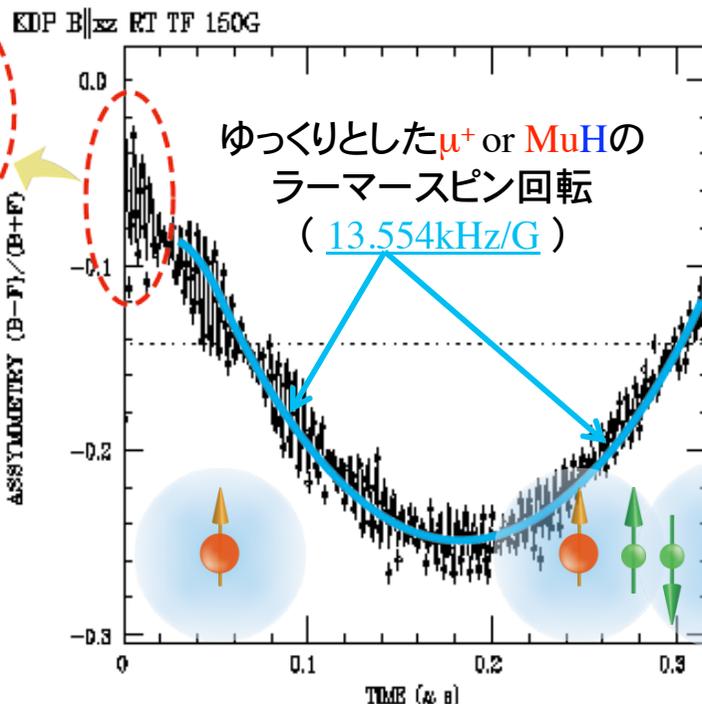
裸の μ^+ (H⁺相当)
13.554kHz/Gで
ラーマースピン回転



MuH (H₂相当)、MuOH (H₂O相当)
ミュオンと水素の電子スピンの打ち消し合い
あたかも裸のミュオンのように振る舞う。



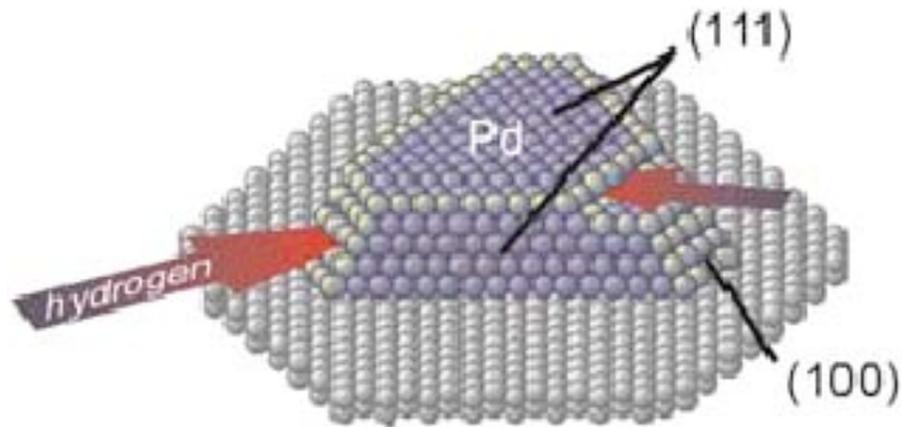
Muのラーマースピン回転
(1.39MHz/G)



例えば、
 $\text{Mu} + \text{H} \rightarrow \text{MuH}$ の化学反応では

- Mu: 1.39MHz/Gの回転で検出できる。
- MuH: 共鳴実験で反応の始状態、中間段階、終状態が、13.554kHz/Gの回転でわかる。(精度の良い共鳴実験によって、判別可能)

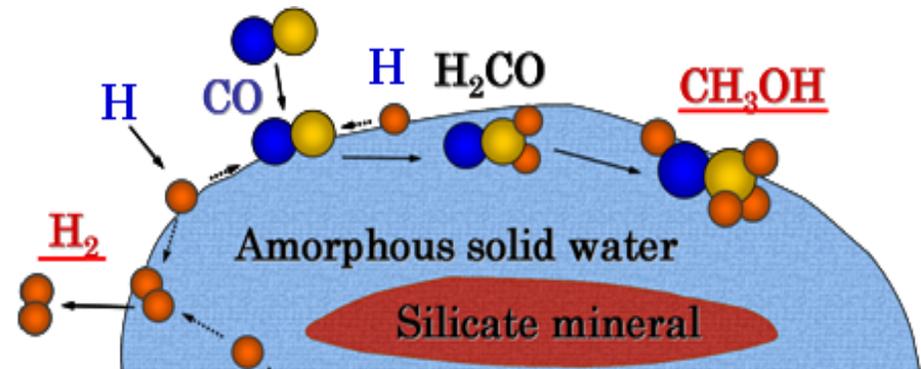
- ・金属ナノクラスター
バルクにはない反応性



- ・表面水素
- ・吸収水素 \implies 炭化水素の水素化反応

M. Wilde et al., ACIE 47 (2008) 1.

- ・氷表面
宇宙における化学進化の場



主役は水素



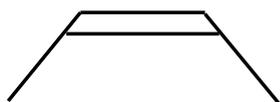
N. Watanabe, A. Kouchi, PSS 83 (2008) 439

- ・氷／クラスター表面の役割
- ・水素の電子状態
- ・拡散係数

} 不明!

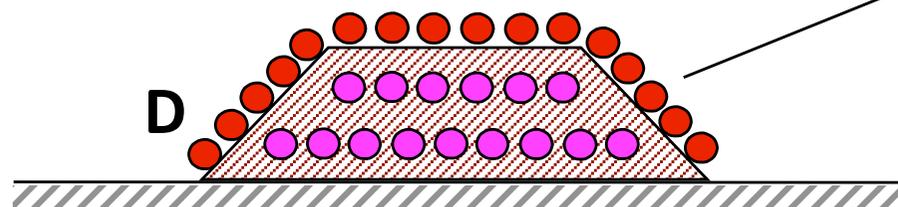
Pdナノ粒子上での炭化水素の反応

cis-2-butene



異性化:
表面吸着水素を媒介

水素化:
内部の水素を媒介



Pd nano cluster

表面水素(●)と内部の水素(●)
電子状態, 運動状態?

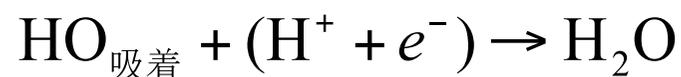
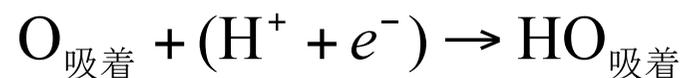
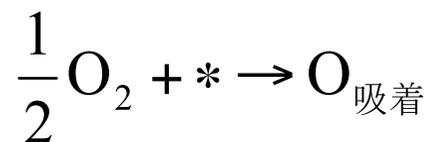
$H^{\delta-}$

$H^{\delta+}$

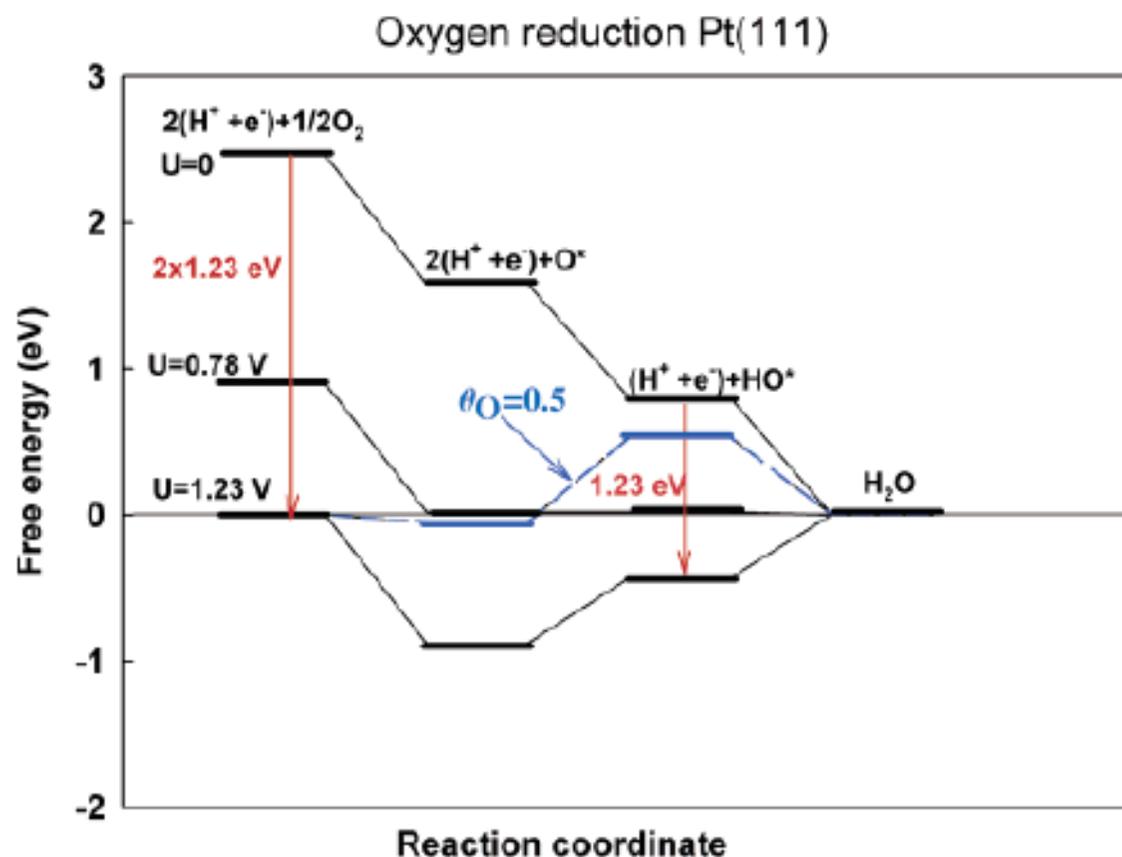
燃料電池：電極反応

- $\text{H}_2 \rightarrow 2(\text{H}^+ + \text{e}^-)$
 - $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2(\text{H}^+ + \text{e}^-) \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- ?

酸素極反応の 機構解明と促進



電位による自由エネルギー変化 (理論計算)



異種材料の接合・接着

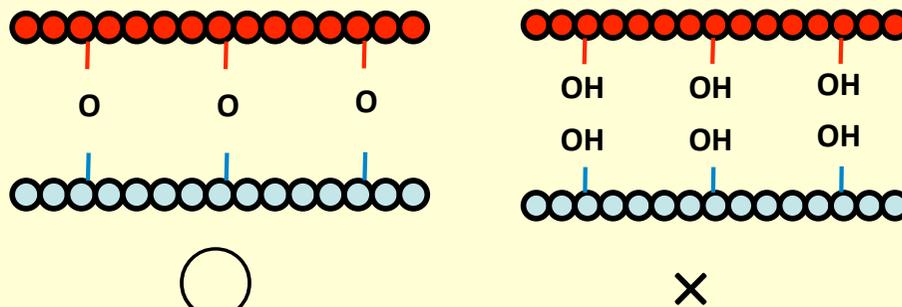
材料の複合化: 摺動・塗装・軽量化

… 接合技術の開発が鍵 (1+1が3にも0にもなりうる)

*メカニズムの解明が課題 (従来の説は状況証拠に依存)

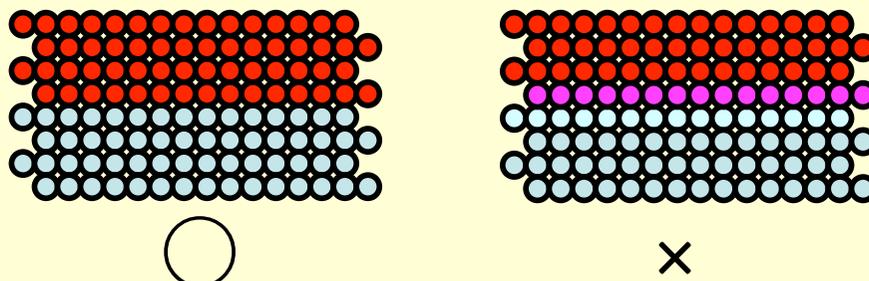
超低速 μ SRによる界面の解析

① 化学結合



←ミュオニウム生成率測定
… 官能基の差を検出

② 分子運動



←緩和測定
… 軟らかい層を検出

マイクロミュオンビーム利用の科学

基礎物質科学 磁性と超伝導

タンパク質における電子伝達の観測

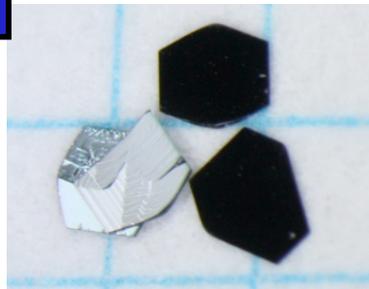
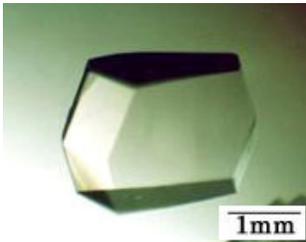
従来の研究

放射光、中性子等による構造の解明を通じて機能性を推測。

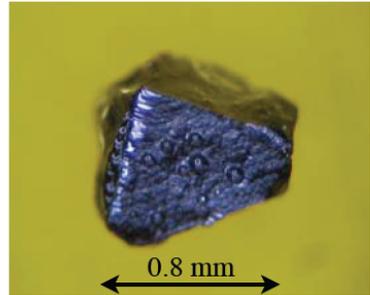
ミュオンではタンパク質における電子伝達の直接観測できることが指摘されている。

→ 機能性の微視的 direct 観測による研究。

電子拡散係数に関する知見の先駆的、萌芽的研究
バイオデバイスなどへの展開



(EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂)



NpO₂

高温超伝導

例 Hg1245系など多層系の研究、層毎に異なる磁性・超伝導状態を解明

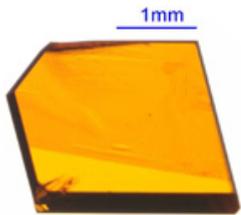
分子性結晶

例 β'-(Cation)[Pd(dmit)₂]₂ のフラストレーションの効果
カチオン（フラストレーション）を系統的に変化させての研究

アクチノイドなど、微量しか用いることが困難な物質群

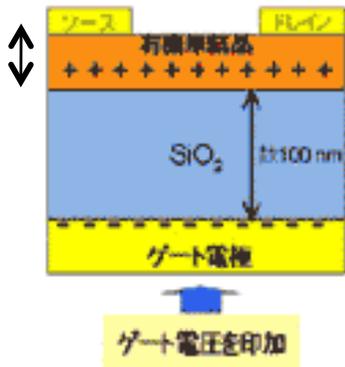
例 NpO₂の²³⁷Npの核磁気緩和時間のスケールはμSRでしか見ることができないため、Np核自体を微視的に直接見ることが可能。
新たな秩序状態に関する知見。

有機FET 正孔蓄積層はどこまで？



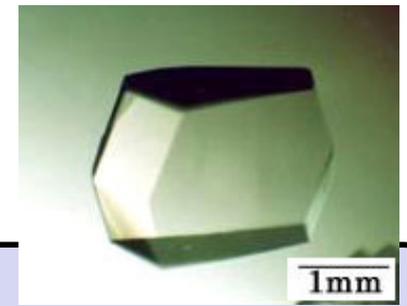
テトラセン

100nm程度



ゲートから注入されたキャリアがどのような分布にあるか？

タンパク質



従来の研究

放射光、中性子等による**構造の解明**を通じて**機能性を推測**。

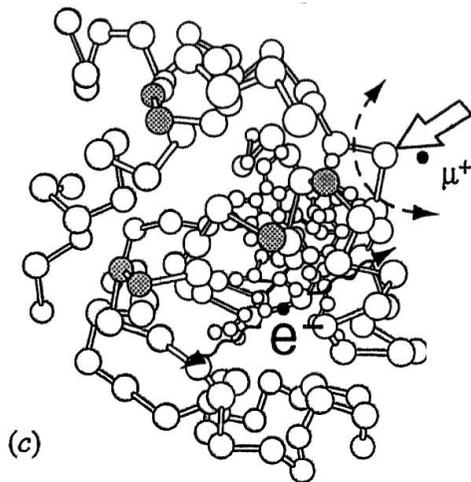
ミュオンではタンパク質における電子伝達の**直接観測**できることが指摘されている。

→ **機能性の微視的**直接観測による研究。

結晶化の難しい**微量タンパク質**や**DNA**の研究。

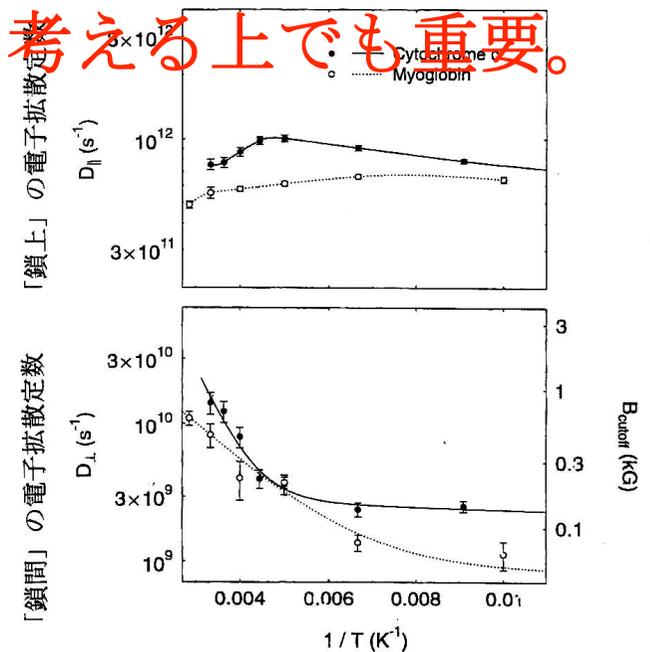
溶液中など**生体に近い環境**での研究も可能。

単結晶との比較は従来の構造からの研究を**考える上でも重要**。



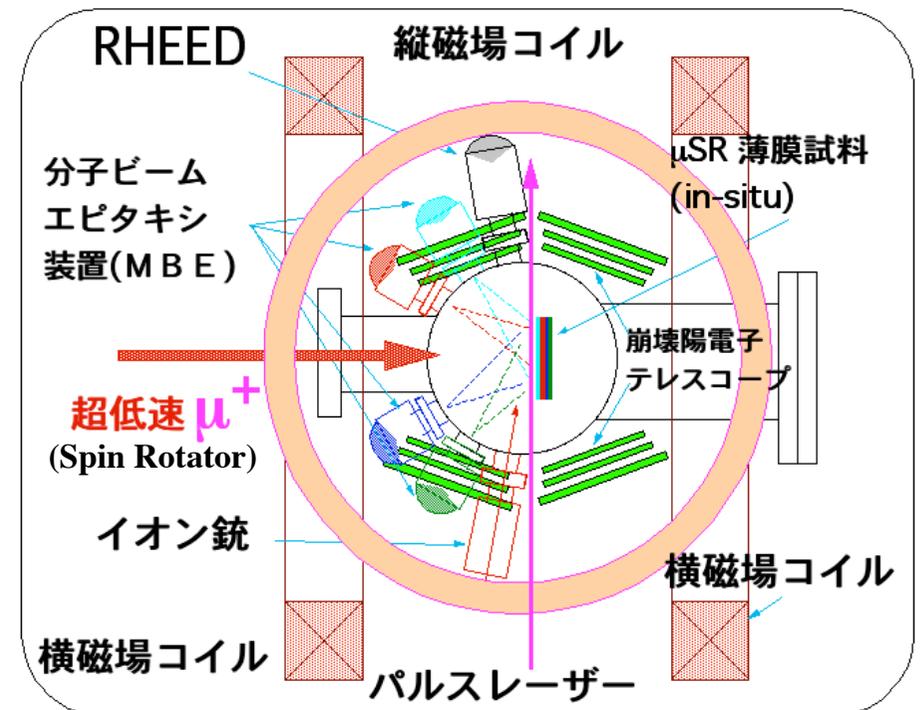
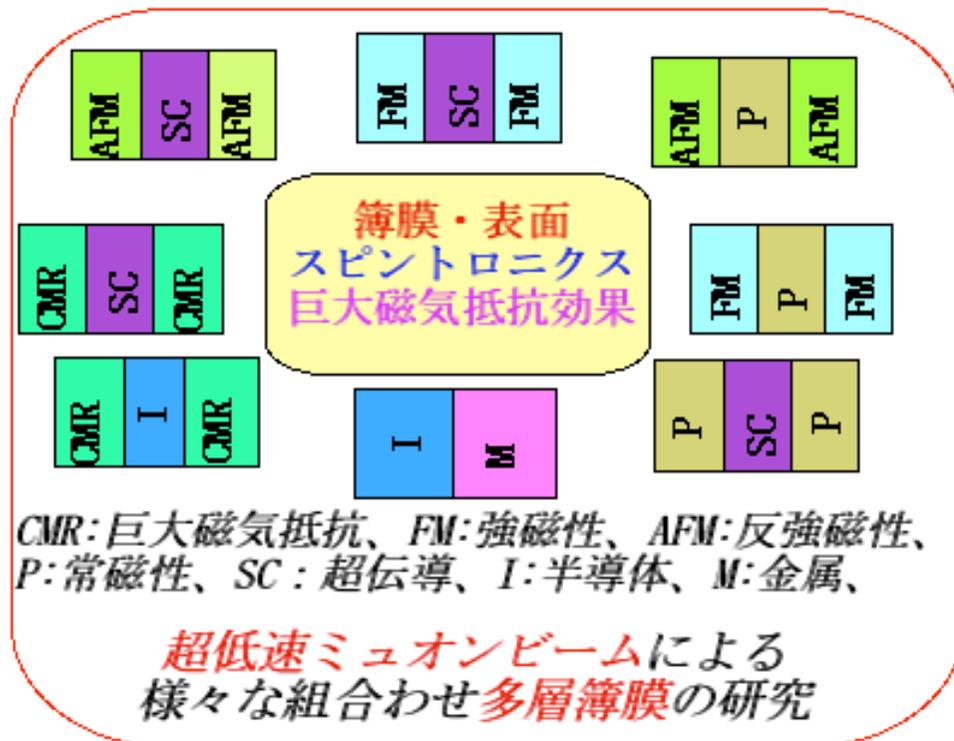
化学結合する際に連れてきた電子が高分子に特有な運動をする。その運動の様子が正ミュオンスピンの緩和現象で調べることができる。

電子拡散係数に関する知見の
先駆的、萌芽的研究
バイオデバイスなどへの展開



STEP5: J-PARCで期待される実験

- J-PARC で得られる大強度超低速ミュオン(1,000,000個/秒) を用いて様々な組み合わせの積層薄膜の研究が可能となる。
- MBE、イオン銃等でin situでの薄膜生成
- スピンローテータにより任意のspin方向での打ち込みが可能
- パルスレーザー、パルスRF等の極端条件との同期



超低速ミュオンが拓く表面・界面・薄膜の先端ナノサイエンス

大強度陽子
ビームの
安定供給

J-PARC

超低速ビーム発生

大強度超低速ミュオン源の構築
KEK (三宅、西山、下村、河村、Strasser、中原、藤森、牧村、幸田)、東大 (松田)、理研 (石田)

新技術の開発

大口径湾曲超伝導電磁石
KEK低温 (萩津、榎田、山本)、KEK (池戸、下村、三宅)

高輝度レーザー開発
理研 (松田、Bakule、岩崎)
KEK (三宅、下村)、
東大 (久我、松田)

超低速ミュオン
源グループ

利用グループ

大学、研究機関、企業 国内、国外、超低速ビーム利用の科学研究

水素の電子状態とダイナミクス

東大 (福谷、常行、小倉、Markus)、
京大 (金谷)、阪大 (笠井)、
北大 (渡邊)、
豊田中研 (杉山)

水素化反応機構
表面水素のダイナミクス
高分子ガラス転移
燃料電池電極電解質界面

磁性超伝導の表面界面薄膜研究

東工大 (西田、吉野、大熊、井澤)
山梨大 (鳥養、白木)、
東北大 (池田)、物材機構 (平田、竹屋)、
北陸先端 (寺倉)、UCR (永嶺)

異方的超伝導境界効果
スピントロニクス基礎
半導体中の光励起
磁性体-絶縁体接合によるスピン注入

マイクロビーム μ SR

原子力機構 (髭本、芳賀、神戸)
理化学研究所 (加藤)、
東北大学 (小池)、
埼玉大学 (佐藤)

微小分子性結晶
超高品質高温超伝導
超高品質単結晶
単結晶ミュオンスピン共鳴

新規ビーム
による新しい
科学

新しい概念
新しい科学
人材育成

若手の登用
研究テーマ

連携と協力
拠点形成

連携と協力

素粒子物理

物質科学 (物理、化学、生物)、産業

世界のミュオン科学

社会

まとめ

超低速ミュオンは、表面・界面・薄膜の先端ナノサイエンスに革新をもたらす。

Intense Slow μ^+ at J-PARC will be realized!

- **Short Implantation Depth**
- **Short Pulse Width (ns (Now) --> ps, fs (Future))**
- **Microbeam ($\phi \sim 5$ mm (Now) --> $< \phi$ 1mm)**
 - **Since start with 0.2 eV (2000 degree)**
 - **Small emittance**

1)Surface Magnetism

2)Surface Chemistry

3)Precise QED Measurement

4)Ion Source for futher Acceleration

(to be used for $\mu^+ \mu^-$ collider)

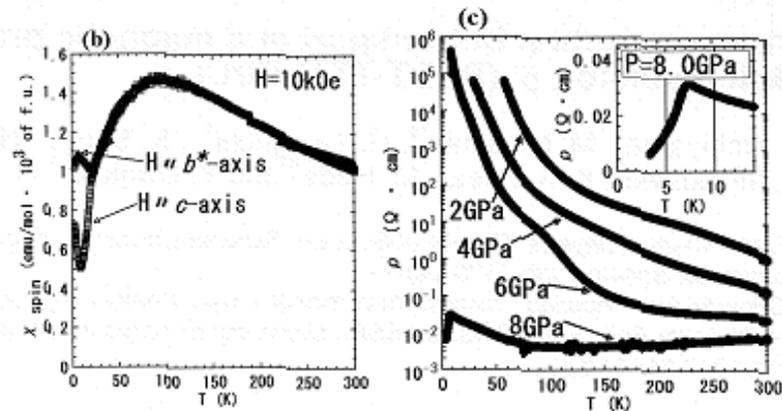
STEP5:PSI と J-PARC超低速ミュオンの比較

日本グループによって開発されてきた高輝度パルス状レーザーライマン α 光を用いた共鳴イオン化プロセスによる**共鳴イオン化法**とスイスPSI研究所で精力的に行われているアルゴン・窒素中でのミュオンの減速と再放出を利用した**減速法**によって得られる**低速ミュオン**の基本性能比較

	レーザー共鳴イオン化法	減速法 (固体アルゴン)
実施グループ、場所	J-PARC、理研 RAL、KEK(パルス)	PSI, TRIUMF(DC)
ビームエネルギー	0-30 keV	0-30 keV
単色性	0.2 eV	10-100 eV
深さ方向の分解能	~ a few nm	~ 5 nm
ビームサイズ	ϕ 0.5-1 mm	ϕ 10-15 mm
ビーム時間幅・分解能	数 100 ピコ秒~ナノ秒	10 ナノ秒以上
パルス同期	可能	不可
ビーム強度	$1-5 \times 10^6$ /sec (20/sec@理研 RAL)	8×10^3 /sec
予算	なし(J-PARC) ! phase2 予算待ち	十分について、更に新ビームライン

μ SR Study of Organic Antiferromagnet β' -(BEDT-TTF)₂I₂BrCl

K.Satoh (Saitama), W.Higemoto(JAEA) et al.

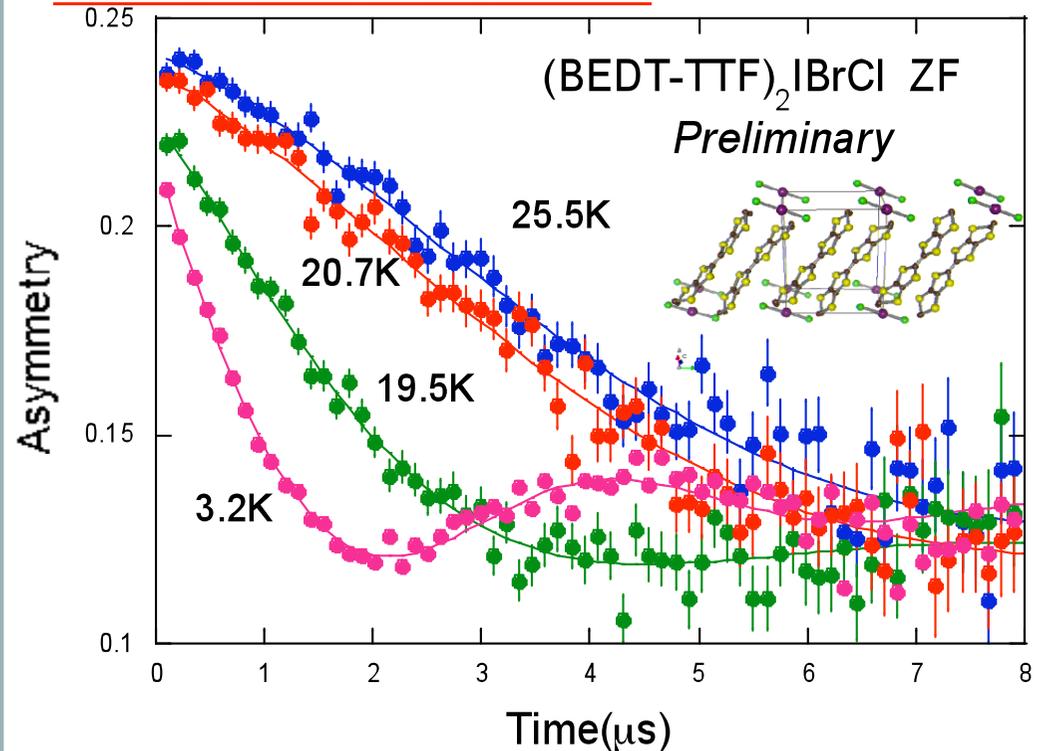


Strong competition between superconductivity and magnetism was suggested from bulk measurement .

Microscopic study by using μ SR to investigate a nature of the magnetic state.



Present result at MUSE-D1

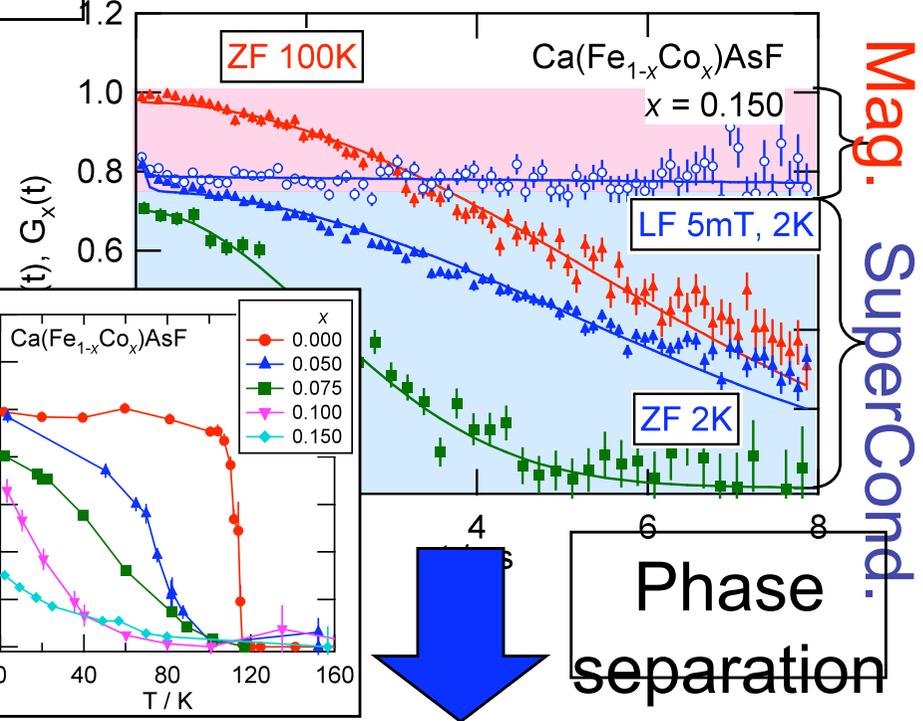
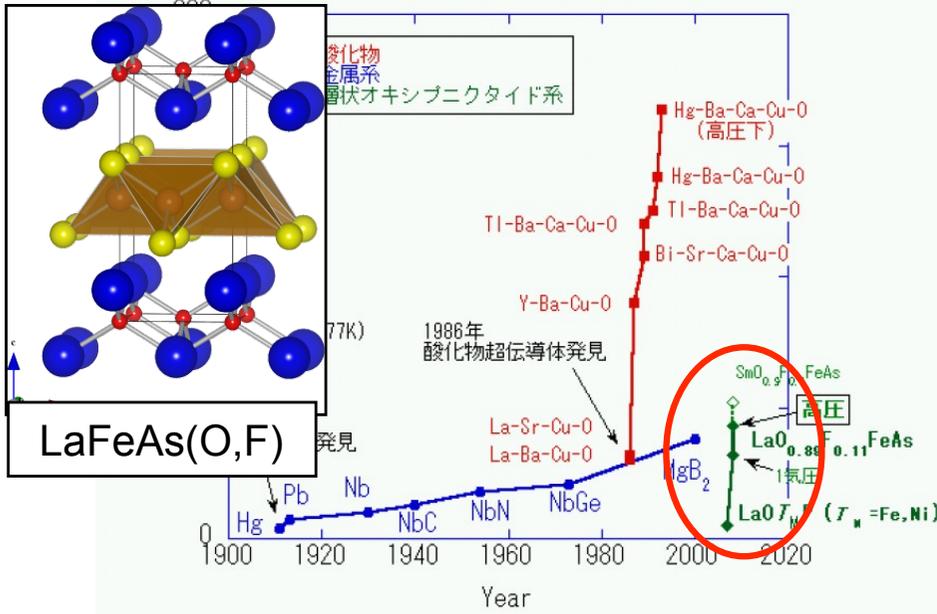


Spontaneous Muon Spin Precession was observed

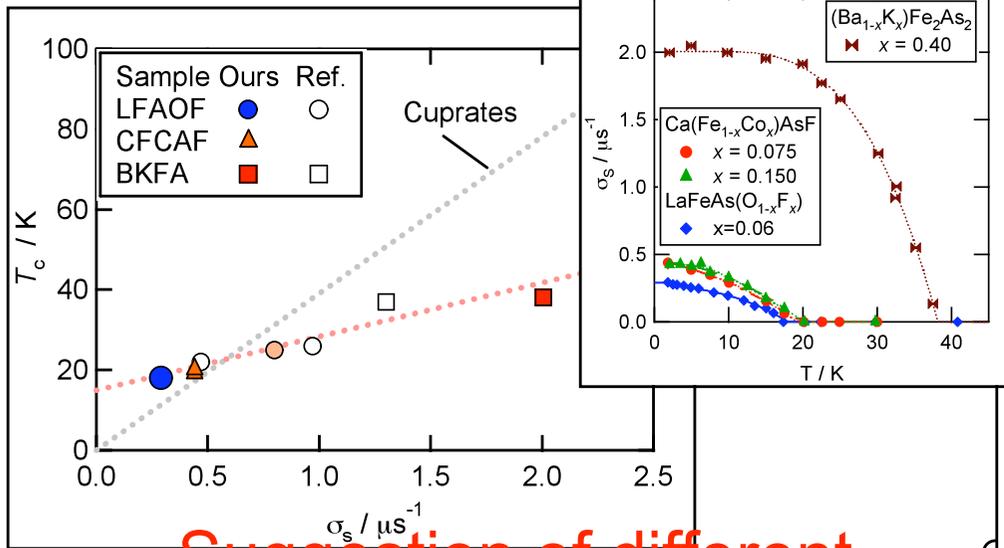


Evidence of Antiferromagnetic State below 20K.

μ SR in Ironpnictide superconductor (Takeshita et al. *PRL* 103 027002)

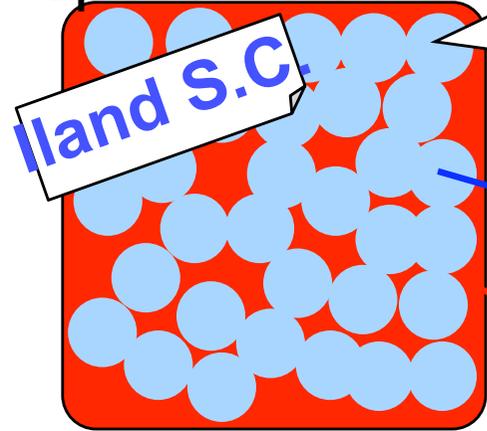


Mag. SuperCond.



Suggestion of different mechanism from cuprate superconductor!

Aspect inside sample

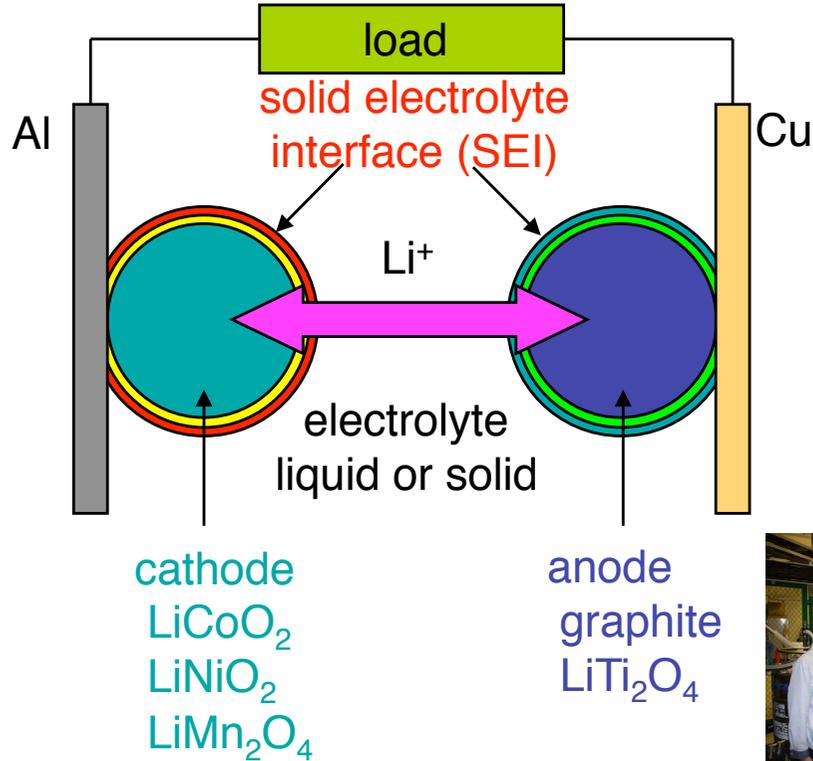


Only μ SR can probe such a situation!
S.C. phase
Mag. phase

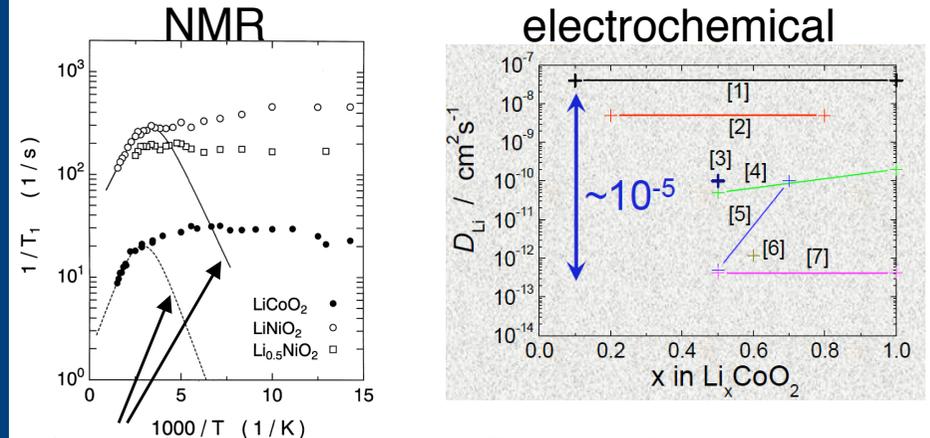
Island Superconductor!

μ SR experiment on Li-battery materials

schematic concept of Li-battery



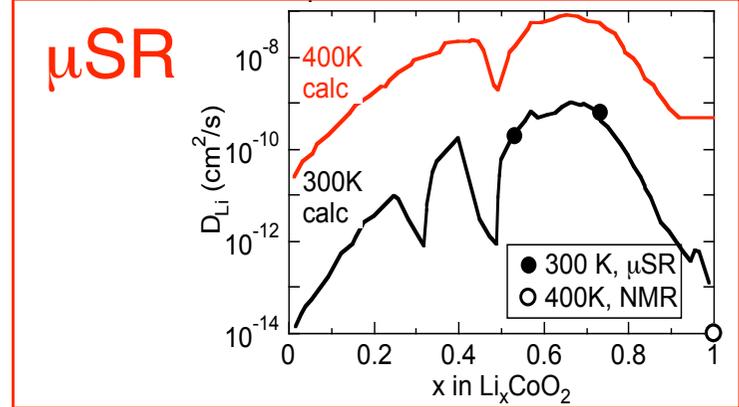
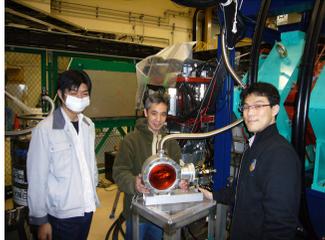
Past work for D_{Li} measurements



predicted curve for D_{Li} . D_{Li} strongly depends on Co or Ni spins affect T_1 . how to measure it.

In order to know the Li diffusion (D_{Li}) in each component, we need a technique to measure D_{Li} for the materials including magnetic ions and for the interface with 10-20 nm thickness.

μ SR, using surface and ultra-slow muons, is the only technique to provide such information.



D_{Li} obtained by μ SR is in good agreement with D_{Li}^{calc} predicted by a first principle calculation. We are, thus, measuring D_{Li} for the Li-battery materials in order to make a database of D_{Li} .

Study of novel phase transition in f-electron system

- high-order "multipole" ordering-

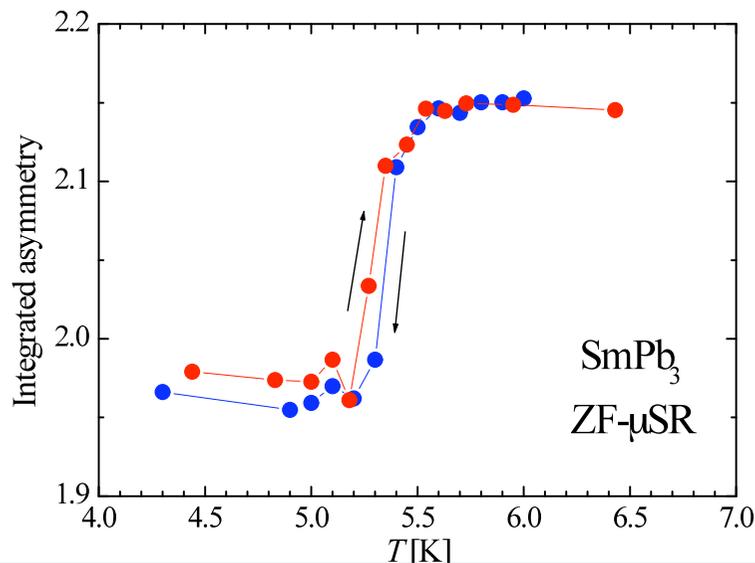
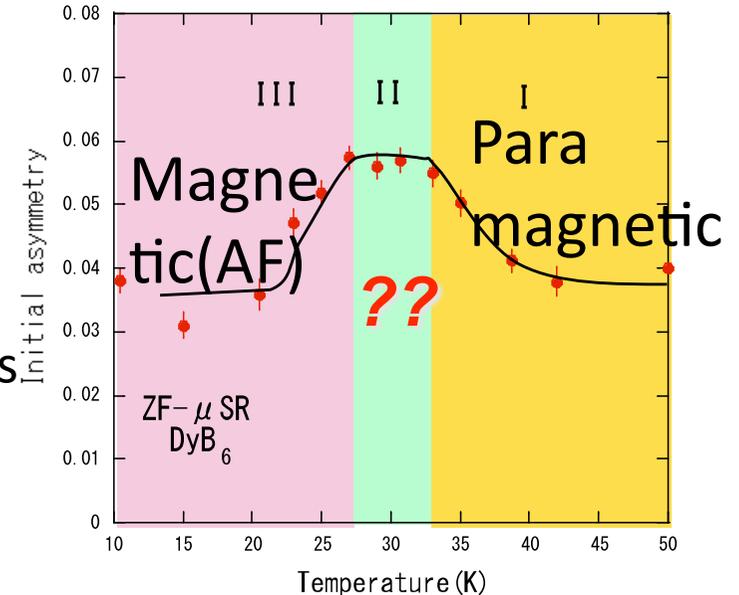
T.U.Ito (JAEA-ASRC) et al.,

DyB₆

What is primary order parameter in Phase II
 → electric Quadrupole or higher order multipole ordering?

μSR → observation of magnetic state
 The local magnetic state differs in the three phases

A higher-order magnetic multipole (Octupole) plays an important role in the phase II??



SmPb₃

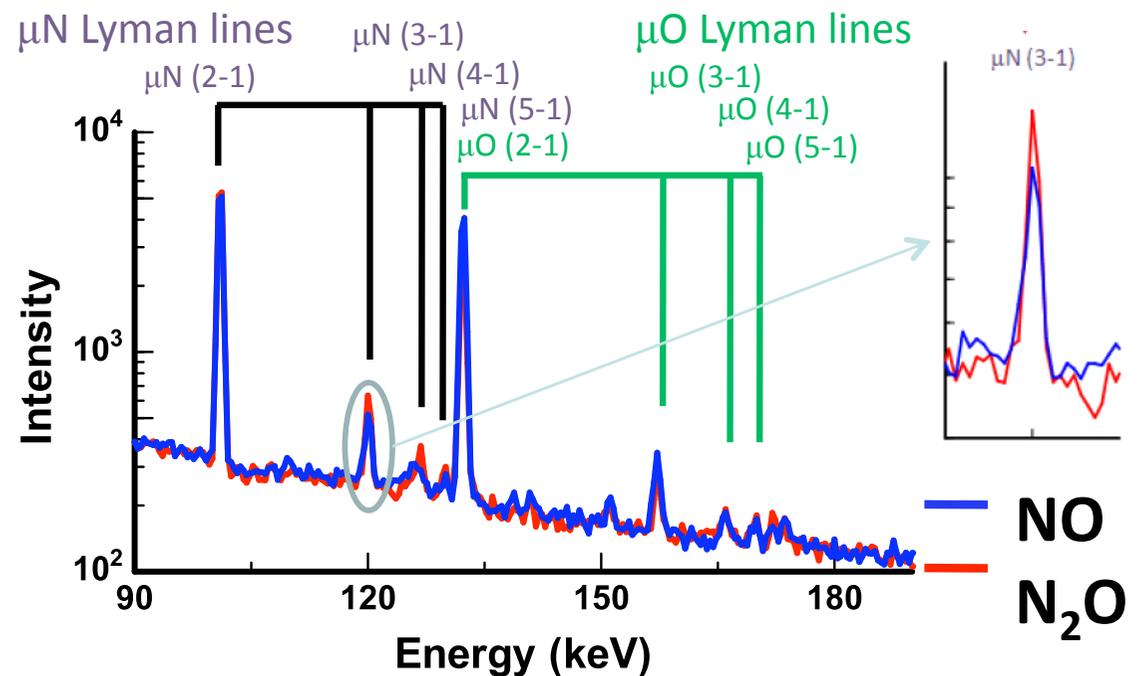
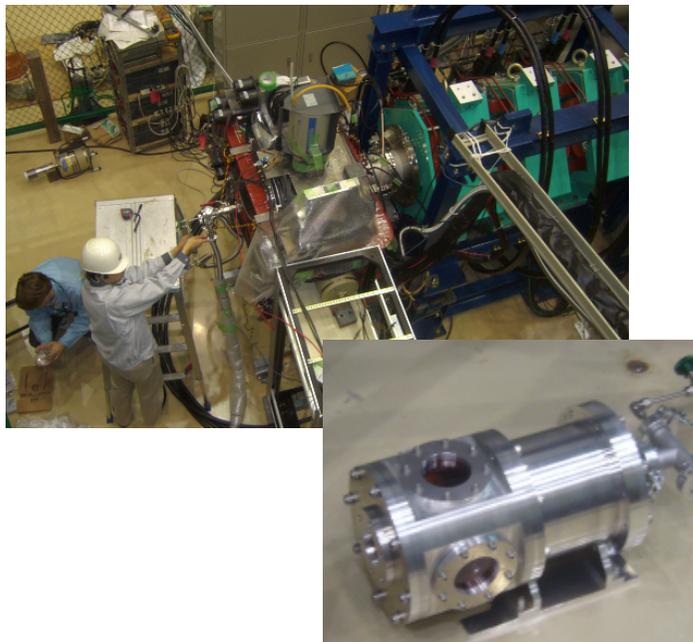
First-order phase transition at 5K due to multipole (dipole, quadrupole, and octupole)??

μSR → Appearance of local magnetic field
The primary order parameter is magnetic (dipole or octupole).
No clear evidence of the hysteresis in the integrated asymmetry in ZF.

Investigation of molecular effect in the formation process of muonic atom

K.Ninomiya (JAEA-ASRC) et al.,

The formation process of muonic atom is strongly influenced by the muon capturing molecule. This study aims to investigate **the molecular effect in muonic atom formation** from muonic X-ray spectroscopy using low pressure gas samples.



Samples: NO, N₂O (1 atm)

Muon beam:

Negative, 19 MeV/c

X-ray structure in NO sample is different from N₂O sample (e.g. $\mu\text{N}(3-1)/\mu\text{N}(2-1)$ ratio)

→ **different initial states of captured muons**

μ SR study on CaFe_2O_4 -type NaMn_2O_4 and LiMn_2O_4
K.Tokiwa(Tokyo Science University) et al.,

- LiMn_2O_4 : **Cathode Material of Li-ion-battery**

Electronic state
Sample dependence } Key issue for understanding
of physical property

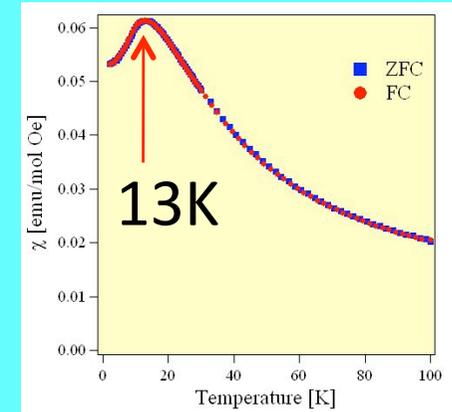


Study of Spin state in Ground State
Frustrated magnetism in LiMn_2O_4 and NaMn_2O_4

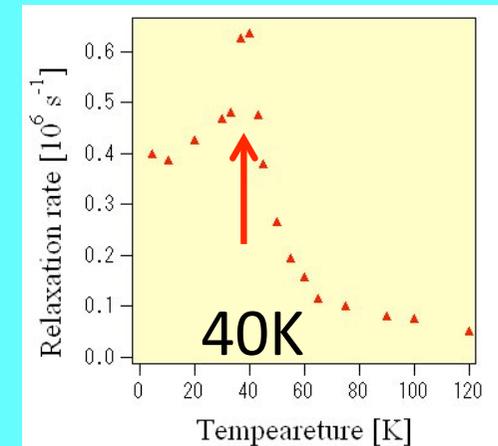
μ SR Results
In NaMn_2O_4 , μ SR and susceptibility shows different temperature dependence!



Suggesting short range ordering and importance of low-dimensionality.

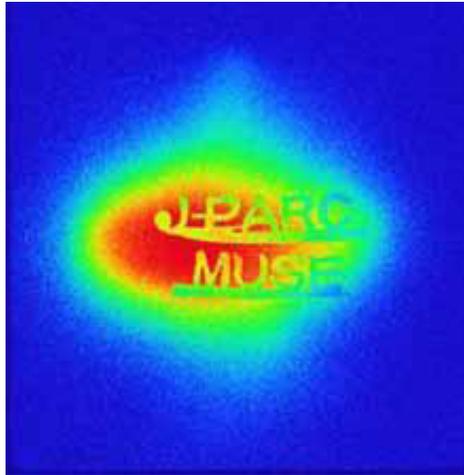


Magnetic Susceptibility
Long-Range Magnetic
Ordering at 13K?



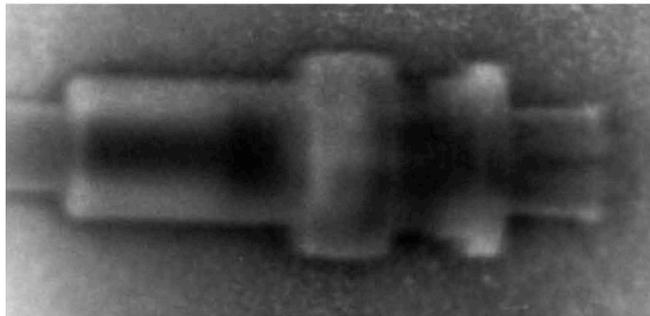
ZF- μ SR
Short-range ordering(?)
at 40K

APPLICATION OF IP TO MUONS



First muon beam at J-

Red part is the strongest.



Transmission muon image of a plug. This can be used for non-destructive testing.

- Most studies on MSR do not care the intensity distribution within a muon beam.
- However, 2-dimensional or 3-dimensional difference in a specimen can be studied by use of IP (Imaging Plates), up to $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$.
- Muon and IP (Imaging Plates) can be used to one of the non-destructive testing.

Search for $\mu^- + A(Z,N) \rightarrow e^- + A(Z,N)$

Forbidden in the Standard Model of Particle Physics.

REALLY EXCITING if this process is found:

- Clear evidence of the physics beyond the Standard Model.
- Related to neutrino oscillation, physics in LHC etc.
- Current Upper Limit (SINDRUM-II@PSI): $BR < 7 \times 10^{-13}$
- Theoretical Predictions: $BR = 10^{-14} \sim 10^{-16}$

Experimental Activities in the world

- MEG(PSI): $BR[\mu \rightarrow e\gamma] < 10^{-13} - \sim 2012$
- COMET(J-PARC MR): $BR[\mu\text{-e conv.}] < 10^{-16} - 2016\sim$

DeeMe(J-PARC MLF): $BR[\mu\text{-e conv.}] < 10^{-14} - \sim 2015$

- Simple, Fast, Low Cost
- Staging: DeeMe \rightarrow COMET



L_μ	1	0	1	0	$\Delta L_\mu = 0$
L_e	0	1	0	-1	$\Delta L_e = 0$



L_μ	1	0	0	0	$\Delta L_\mu = -1 \neq 0$
L_e	0	0	1	0	$\Delta L_e = +1 \neq 0$

