

大阪大学核物理研究センター(RCNP)の 新しい大強度DCミュオン源MuSICの建設現状

大阪大学 大学院理学研究科 佐藤 朗

関西高エネ発表会

2011/03/25、大阪大学理学部

新しいDCミュオン源を大阪大学核物理研究センターに建設中。

- ・ 超伝導磁石による高効率のパイオン捕獲、ミュオン輸送
- ・ ミュオン強度 10^8 /秒 (陽子ビーム 392MeV, 1 μ A)

1. MuSIC概要

2. 建設状況とスケジュール

3. ビームテストの結果

このプロジェクトを***MuSIC***と呼びます。

2010.8.2

MuSIC計画の概要

世界のミュオン施設

ISIS, RIKEN-RAL

TRIUMF

PSI

J-PARC, MUSE

J-PARC, COMET用

FNAL, Mu2e用

RCNP, MuSIC

日本に大強度DCミュオン源ができる
J-PARC-MUSE(パルスビーム) と相補的な役割

- : パルスビーム
- : DCビーム

PSI and MUSE vs. MUSIC



	PSI (稼働中)	MUSE (一部稼働中)	MUSIC
location	Switzerland	J-PARC MLF	RCNP
beam power	1200kW (0.59GeV x 2000μA)	1000 kW (3GeV x 333μA)	0.4 kW (0.4GeV x 1μA)
intensity	$3.8 \times 10^8/\text{sec}$ (μE4)	$10^8/\text{sec}$	$10^8\text{-}10^9/\text{sec}$
time structure	continuous	pulsed (25 Hz)	continuous
beam polarization	high	high	medium
multiple use	many channels	many channels	only one channel
muon yield / proton power	3×10^2 [muons/sec/W]	1×10^2 [muons/sec/W]	$2.5 \times 10^5 - 10^6$ [muons/sec/W]

世界最高のミュオン生成効率、かつ最高のミュオン強度



ECOミュオン源MuSIC

(財) 日本環境協会の承認を得て、エコマークをシンボルマークとして使用していません。MuSICは、エコマーク認定商品ではありません。



MuSICの大立体角パイオン捕獲システム

従来のミュオン施設

MUSE
proton beam

-1000kW

target

graphite

t20mm

ϕ 70mm

陽子ビーム

捕獲用電磁石

スーパーオメガ
立体角:400mSr

ミュオン

陽子ビーム

下流施設へ

MuSIC

MuSIC
proton beam

-0.4kW

target

graphite

t200mm

ϕ 40mm

陽子ビーム

ミュオン

輸送ソレノイド

捕獲ソレノイド

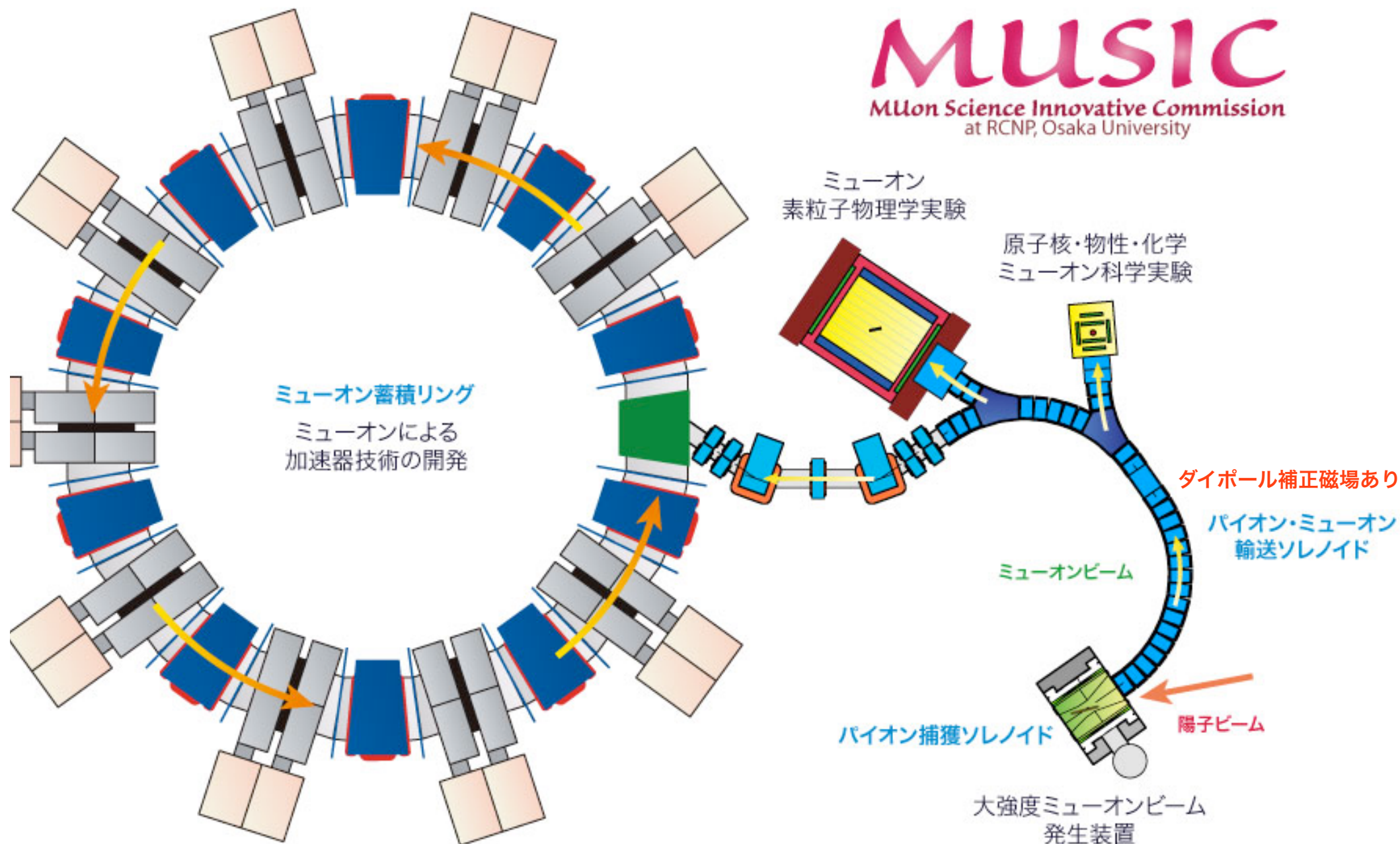
3.5Tのソレノイド磁場で
パイオン・ミュオンを
捕獲

ビームダンプへ

大立体角で捕獲&厚い標的

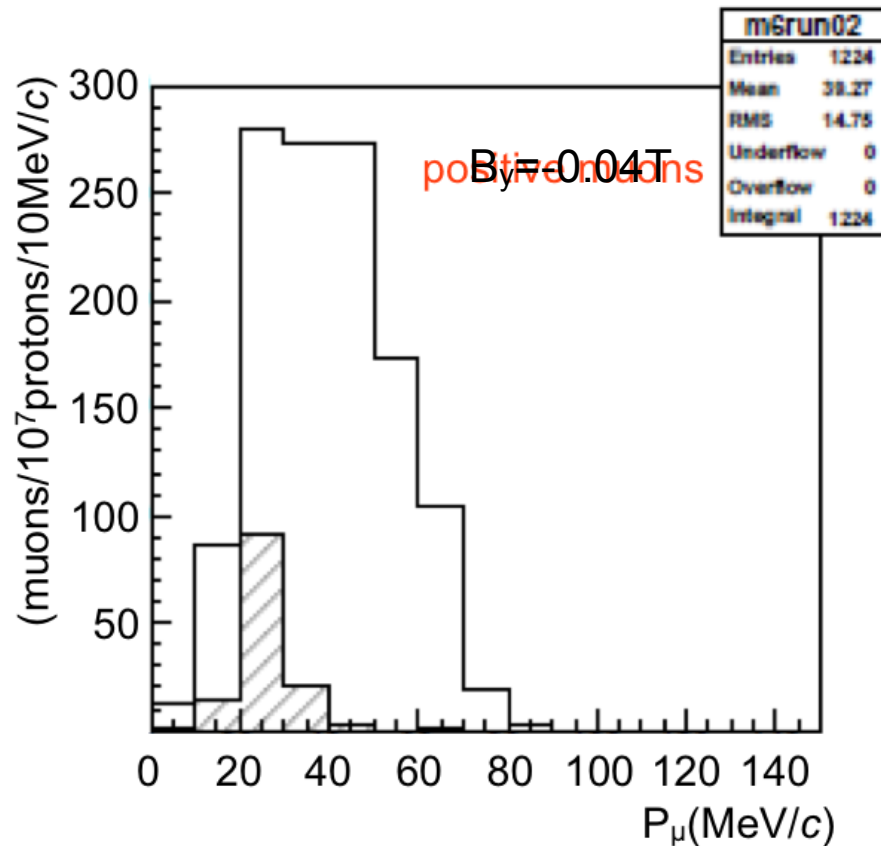
MUSIC

Muon Science Innovative Commission
at RCNP, Osaka University

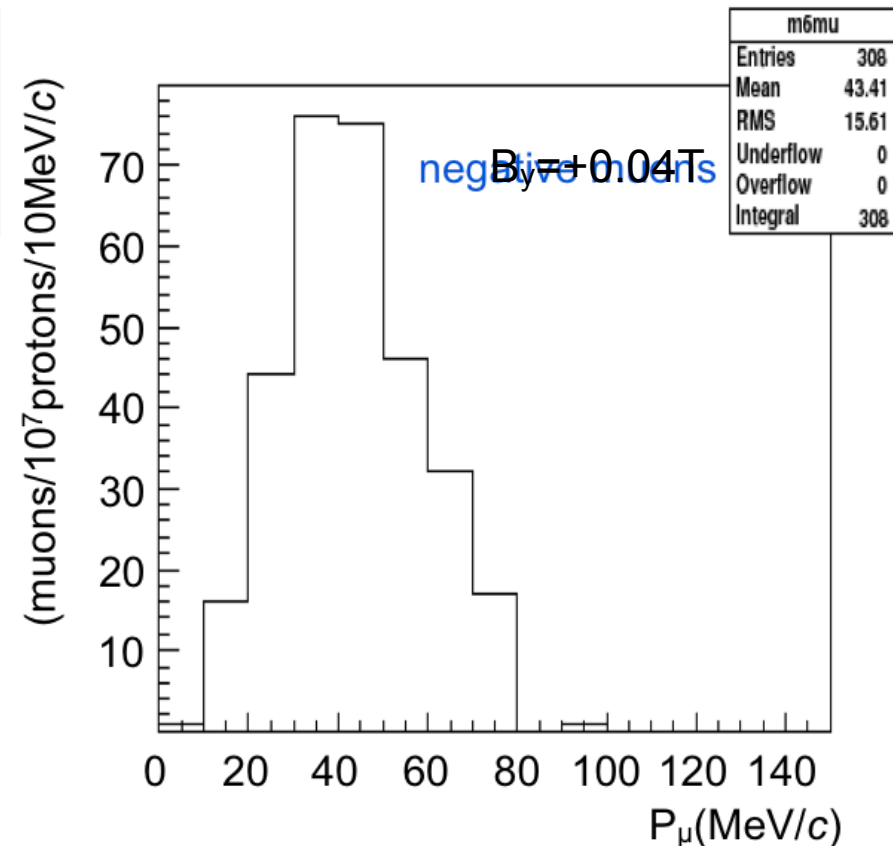


シミュレーションによるミューオン運動量分布の例

- @180度輸送ソレノイド出口 ($B_y = \pm 0.04\text{T}$)



$8 \times 10^8 \mu^+/\text{sec}$
for 400MeV, 1 μA proton beam



$2 \times 10^8 \mu^-/\text{sec}$
for 400MeV, 1 μA proton beam

大阪大学核物理研究センター(RCNP)

@吹田キャンパス

リングサイクロトロン：陽子、軽イオンを加速可能

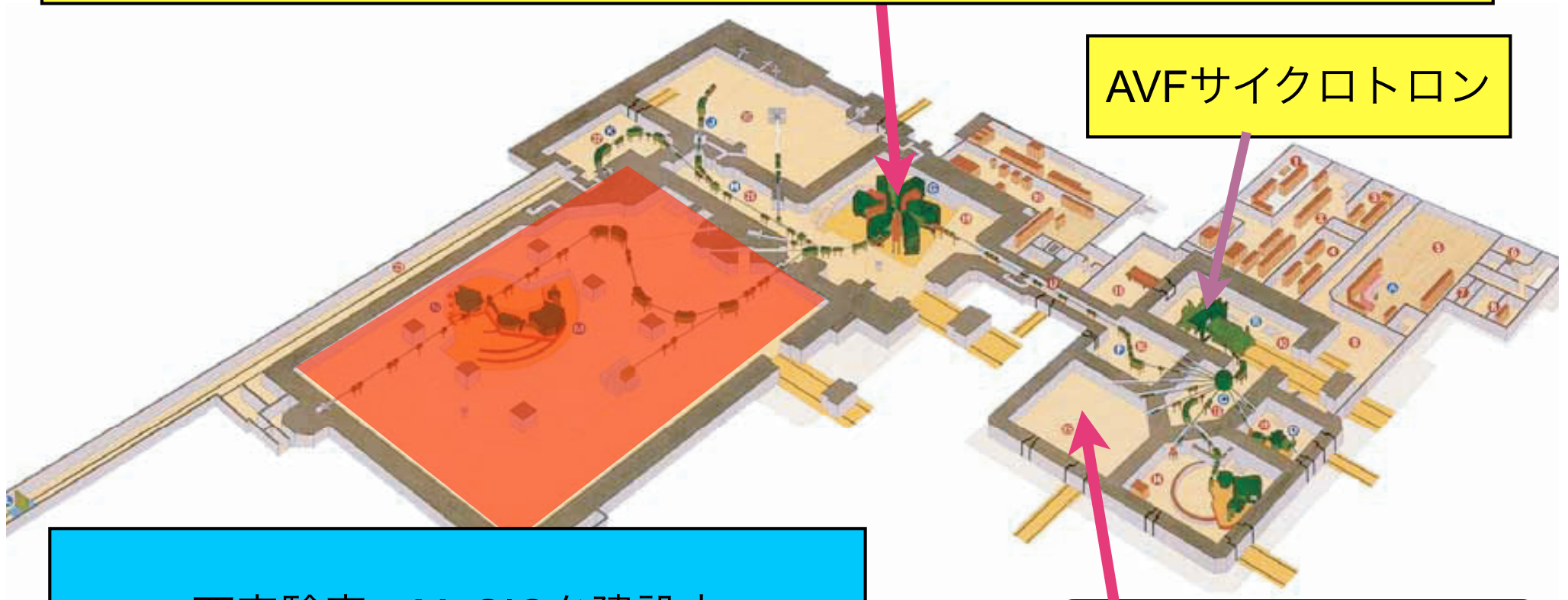
陽子ビームの最大エネルギー：400MeV

現在の最大電流値：1 μ A (将来5-10 μ A)

AVFサイクロトロン

西実験室：MuSICを建設中

PRISM-FFAG R&D



MuSIC完成時の配置案@西実験室

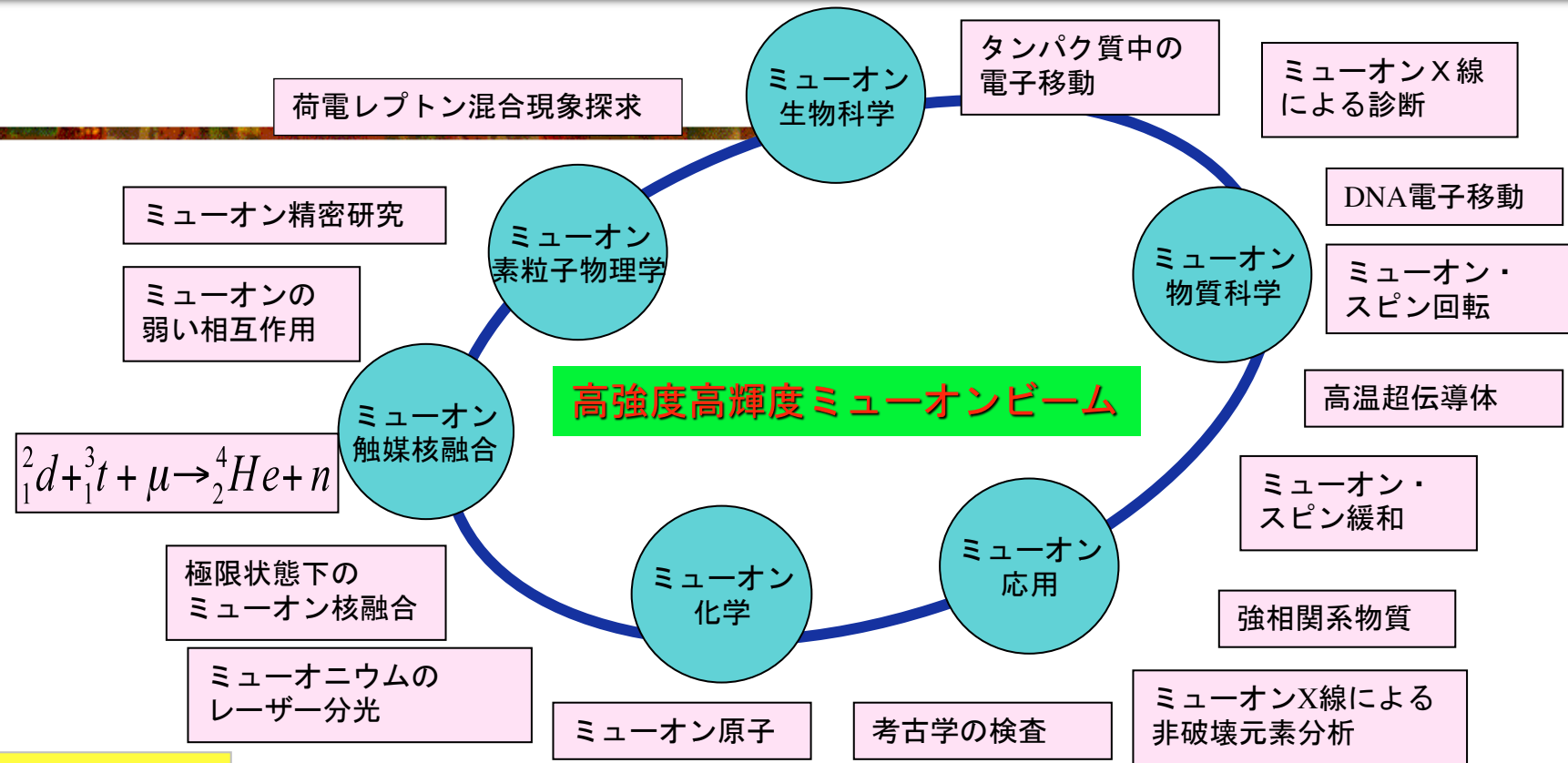




第1回ビーム試験：2010年7月29日-30日

第2回ビーム試験：2011年2月14日-16日

ミューオンサイエンスとは？（大阪大学）



$$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$$

荷電レプトン混合現象探求

クォークの混合とニュートリノ混合は実験的に検証されているが、荷電レプトンの混合は未発見であり、これをミューオンが電子に転換する稀過程を探求することにより発見する。これにより、基本的力の統一やニュートリノ質量の起源等の宇宙創成時の謎の糸口をつかむ。

ミューオンX線による診断

負電荷ミューオンから構成されるミューオン原子は、捕獲された原子の原子番号によって決まったエネルギーのミューオンX線を発生する。このスペクトルを測定することにより、今まで分からなかった生体内部での物質構成やイオンの運動などを検査することができる。

高温超伝導体

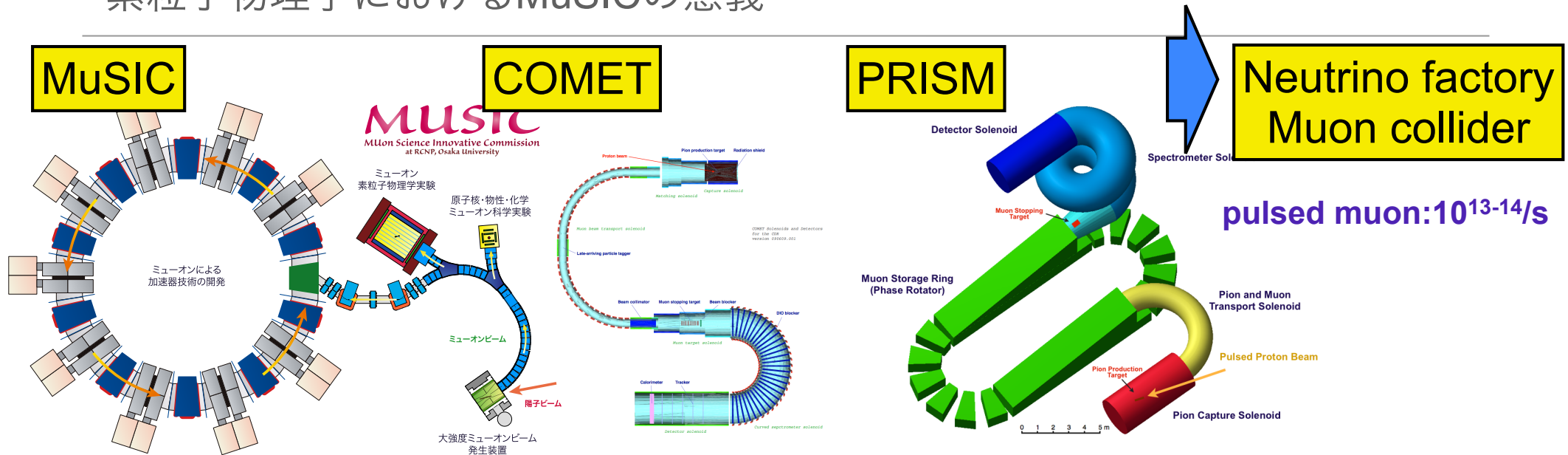
ミューオンはミクロな磁気プローブである。これまでの核磁気共鳴(NMR)などでは磁場が必要であったが、ミューオンは磁場がなくてもプローブでき、超伝導などの臨界現象などのミクロな局所磁場からの高温超伝導体の機構解明に威力を発揮する。

考古学の検査

考古学的研究に資料の成分検査は重要な役割を果たしている。しかしこれまでの成分検査は破壊検査に限られていた。負電荷ミューオンからのX線などの信号を使うことにより、貴重な考古学資料も破壊することなく成分構成を精密に調べることができる。

MuSIC, COMET, PRISM, NF, and MC

- 素粒子物理学におけるMuSICの意義 -



陽子ビーム: 0.4kW

DC muon: $10^8/s$

陽子ビーム: 56kW

pulsed muon: $10^{11}/s$

陽子ビーム: 1000-4000kW

pulsed muon: $10^{12-13}/s$

・ パイオン捕獲システムは将来の大強度ミュオンプログラムに必須。

- ・ ミューオン生成・輸送デザイン
 - ・ 世界初の超伝導ソレノイド大立体角パイオン捕獲システム
 - ・ 世界初の超伝導ソレノイド輸送ライン（補正偏向磁場有り）

・ COMETやPRISMのための、ミュオンビームによるR&D

- ・ 超伝導ソレノイド技術、ミュオン生成量
- ・ μ -eの背景事象
- ・ ミューオンによるビームライン、蓄積リングの開発

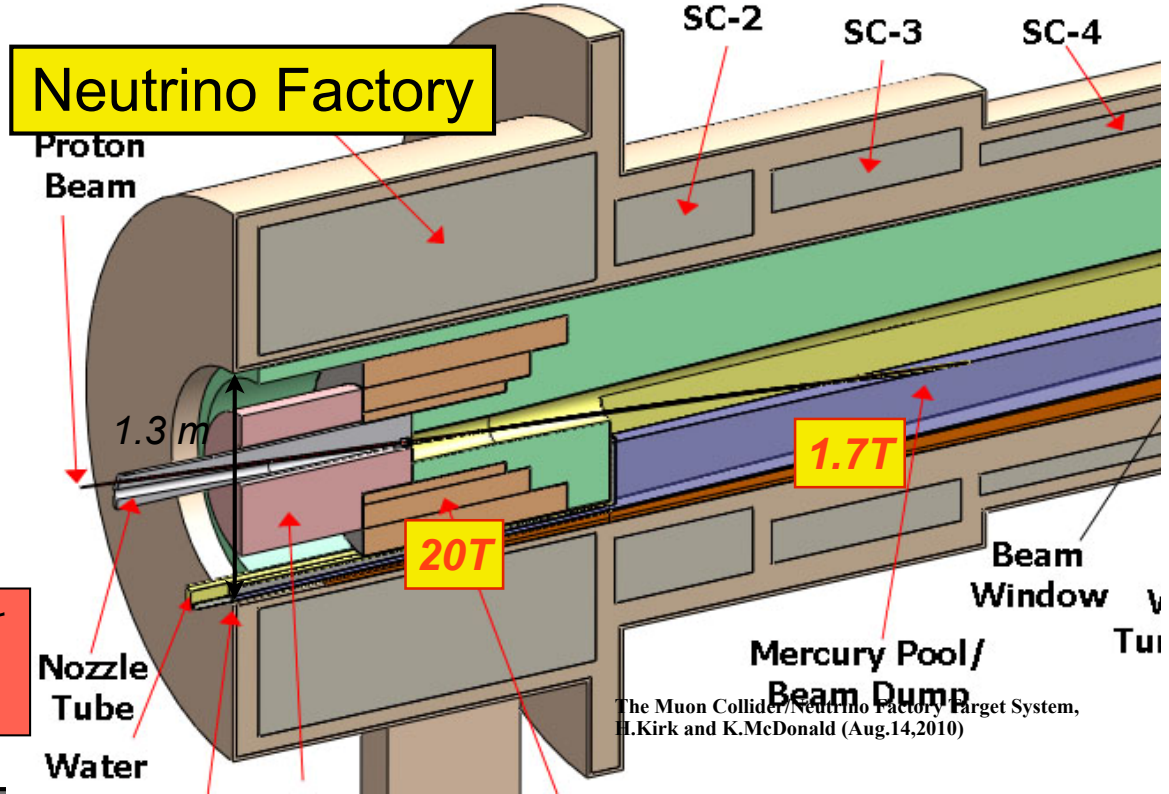
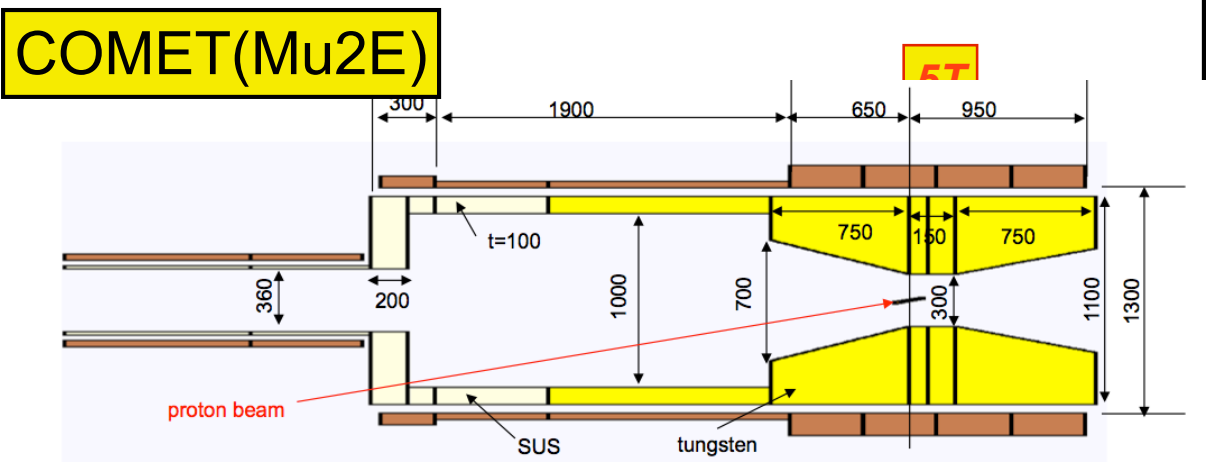
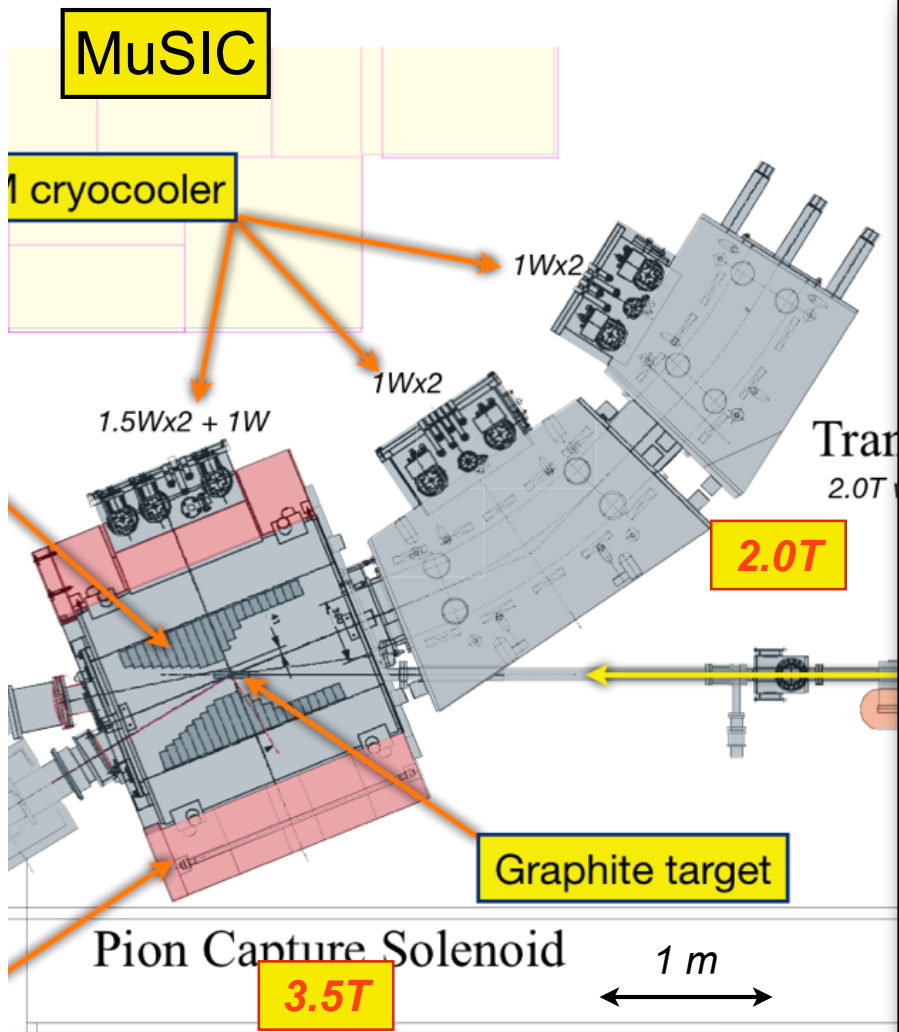
MuSICはCOMET/PRISMのR&Dでもある。
しかし、MuSICでは、 μ -e転換実験はできない。
（ビーム時間構造、強度）
ただし、 $\mu \rightarrow eee$ は可能。

パイオン捕獲システムの比較

	MuSIC	COMET	NuFact ⁽¹⁾
Proton Beam Power	400W (0.4GeV)	56kW (8GeV)	4MW (8GeV)
Production Target	Graphite	Tungsten	Mercury jet
Muon Intensity	$10^{8-9}/\text{sec}$	$10^{11}/\text{sec}$	$10^{12-13}/\text{sec}$
Time structure	Continuous	Pulsed	Pulsed
Muon Momentum	20-70 MeV/c (Backward)	20-70 MeV/c (Backward)	170-500 MeV/c (Forward)
Capture Solenoid Max. Field Strength	3.5 T	5.0 T	20 T
Inner radius of Main SC Coil	0.45 m	0.65 m	0.64 m
Outer radius of Main SC Coil	1.0 m	1.6 m	1.78 m

(1) Based on The Muon Collider/Neutrino Factory Target System,
H.Kirk and K.McDonald (Aug.14,2010) and Study-II report

Pion Capture System in MuSIC, COMET, and NuFact



MuSICは将来のミュオンプログラムに向けた技術開発においても重要な意義を持つ

The Muon Collider/Neutrino Factory Target System, I.Kirk and K.McDonald (Aug.14,2010)

MuSICビームテスト

第2回ビームテスト：2011年2月14日-16日



- 目的
 - 1陽子当たりの生成ミューオン量求める
 - ミューオンX線、 γ 線による化学実験、原子核実験の準備データ取得
- 測定項目
 - ミューオン寿命の測定
 - プラスチックシンチ+MPPC
 - ミューオンX線の測定
 - Ge検出器
 - ミューオン原子核吸収による γ 線の測定
 - NaI検出器

第2回ビームテストメンバー

- **阪大理**

- 久野研：佐藤朗、坂本英之、久野良孝、曳田俊介、Tran Nam Hoai、Nguyen Minh Truong
- 篠原研：篠原厚、笠松良崇、藤原一哉

- **KEK**

- 吉田誠、足立泰平(東大)

- **UCL, UK**

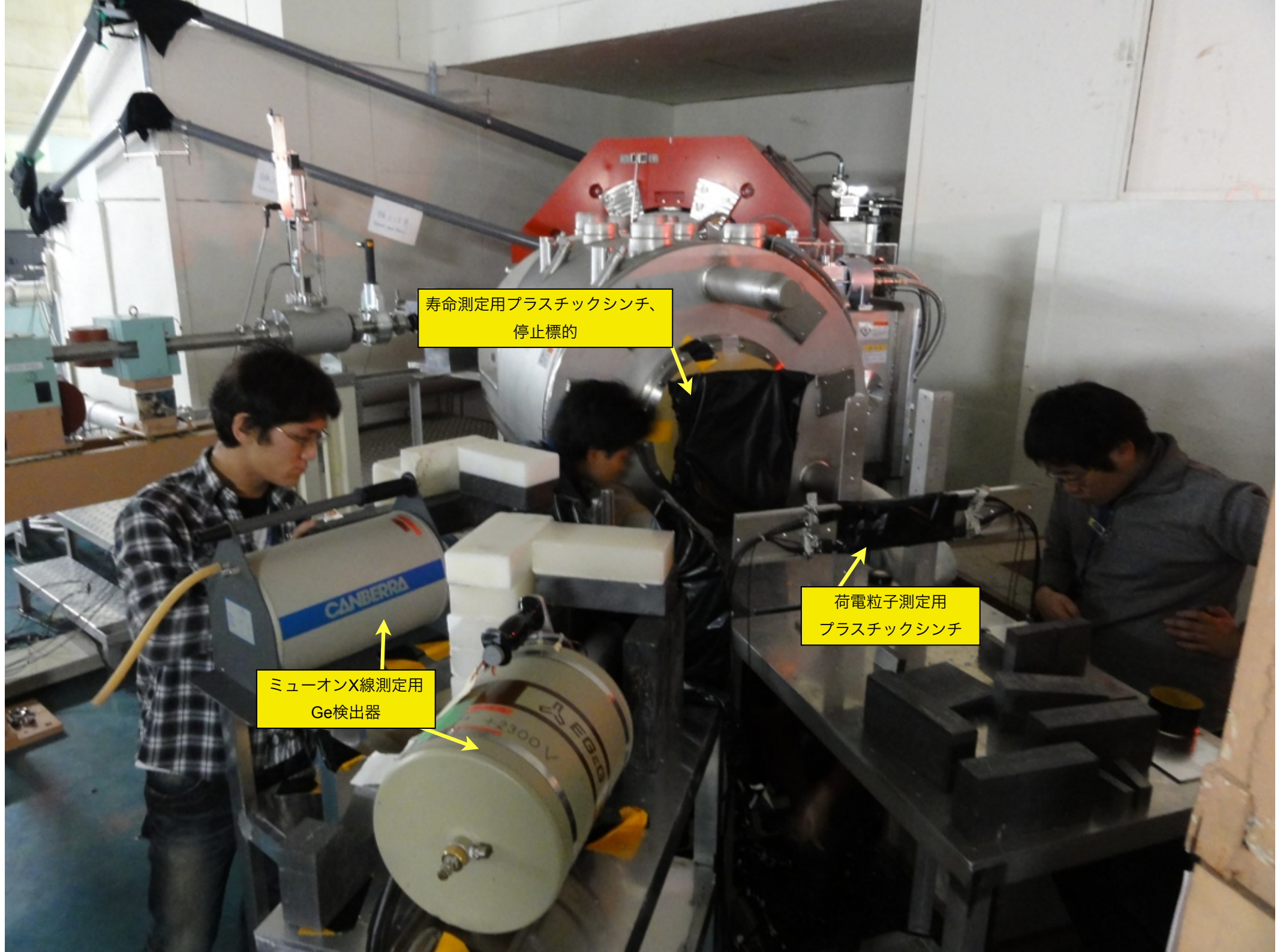
- Sam Cook, Richard D'Arcy

- **京大原子炉実験所**

- 森義治

- **University of Saskatchewan, Canada**

- Chary Rangacharyulu

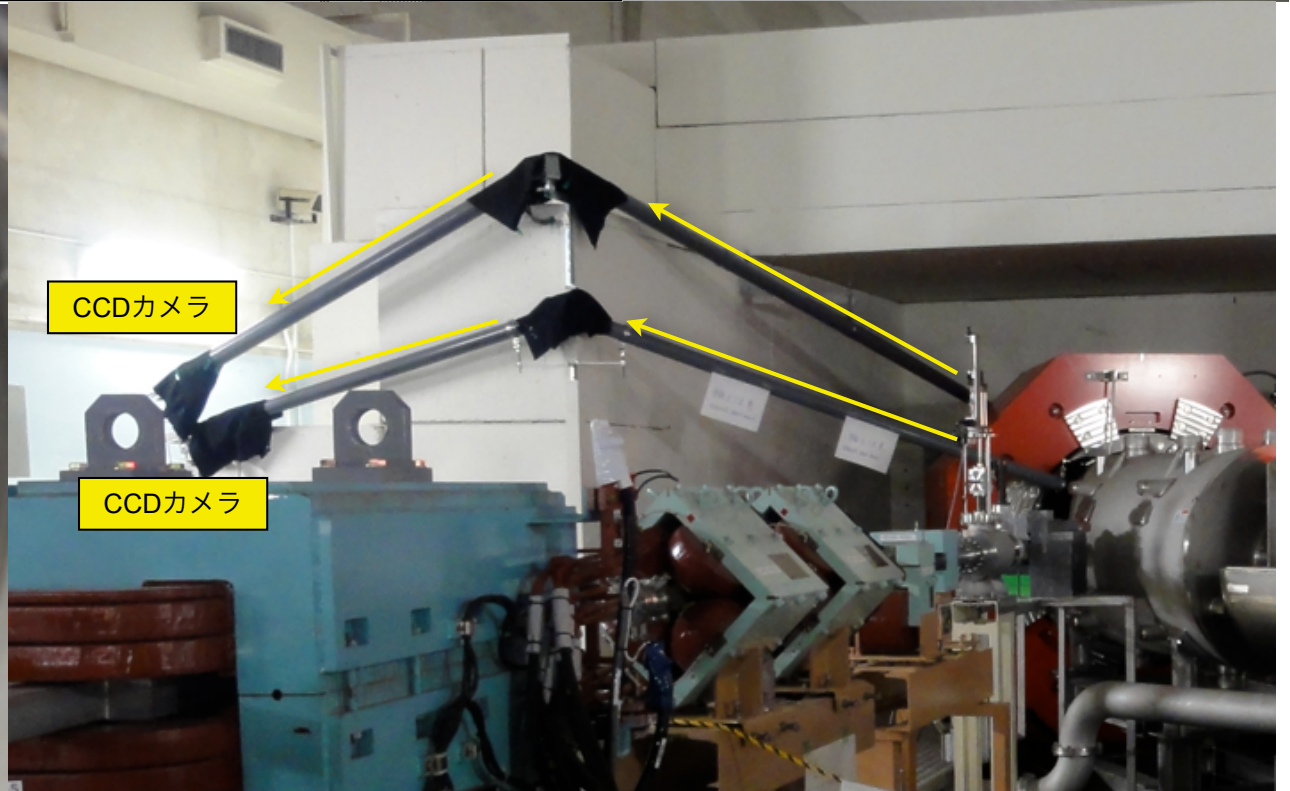
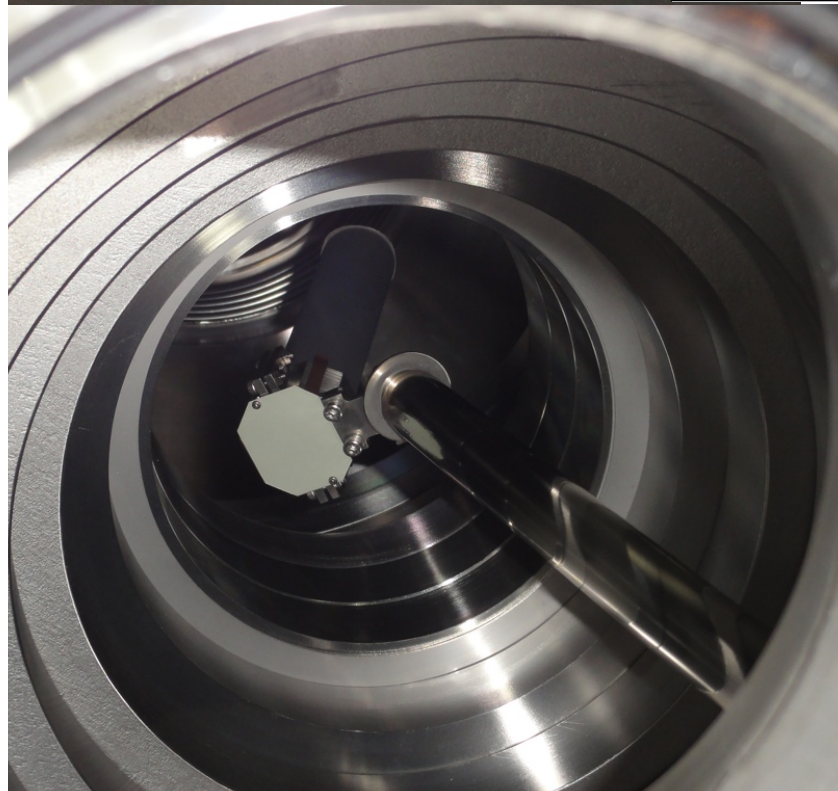
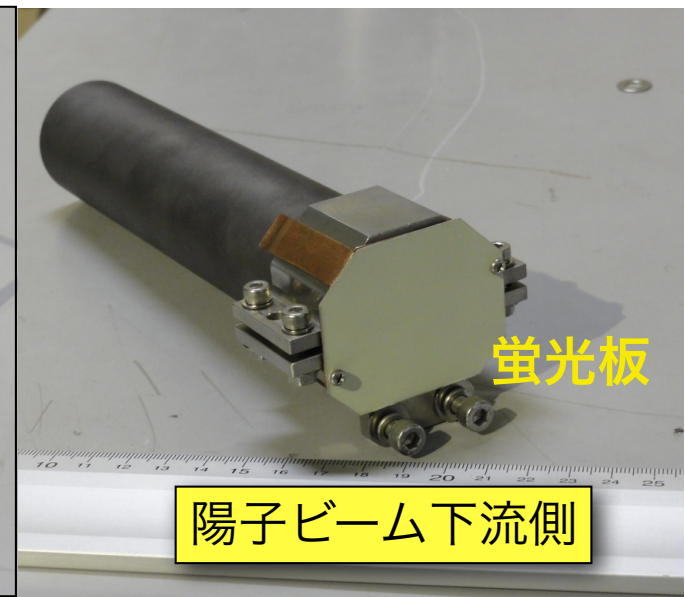
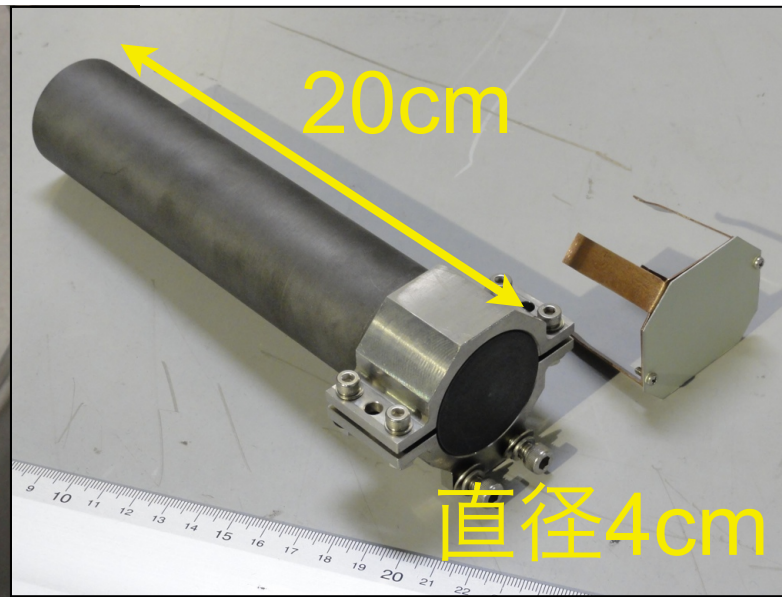


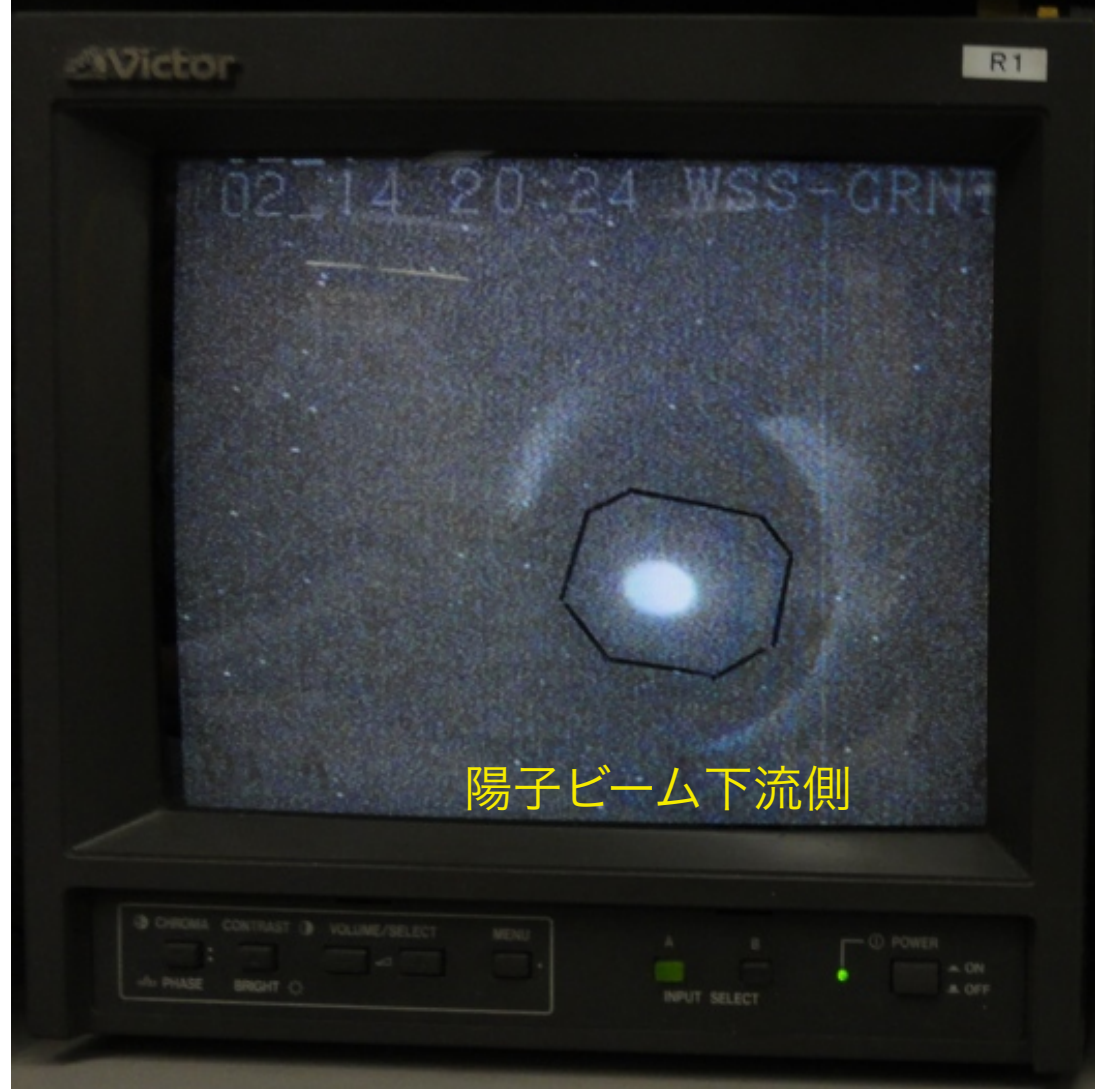
寿命測定用プラスチックシンチ、
停止標的

ミュオンX線測定用
Ge検出器

荷電粒子測定用
プラスチックシンチ

パイオン生成用グラファイト標的





陽子ビーム下流側



陽子ビーム上流側

陽子ビームがグラフィット標的に当たっているところ。

陽子ビーム電流値の測定

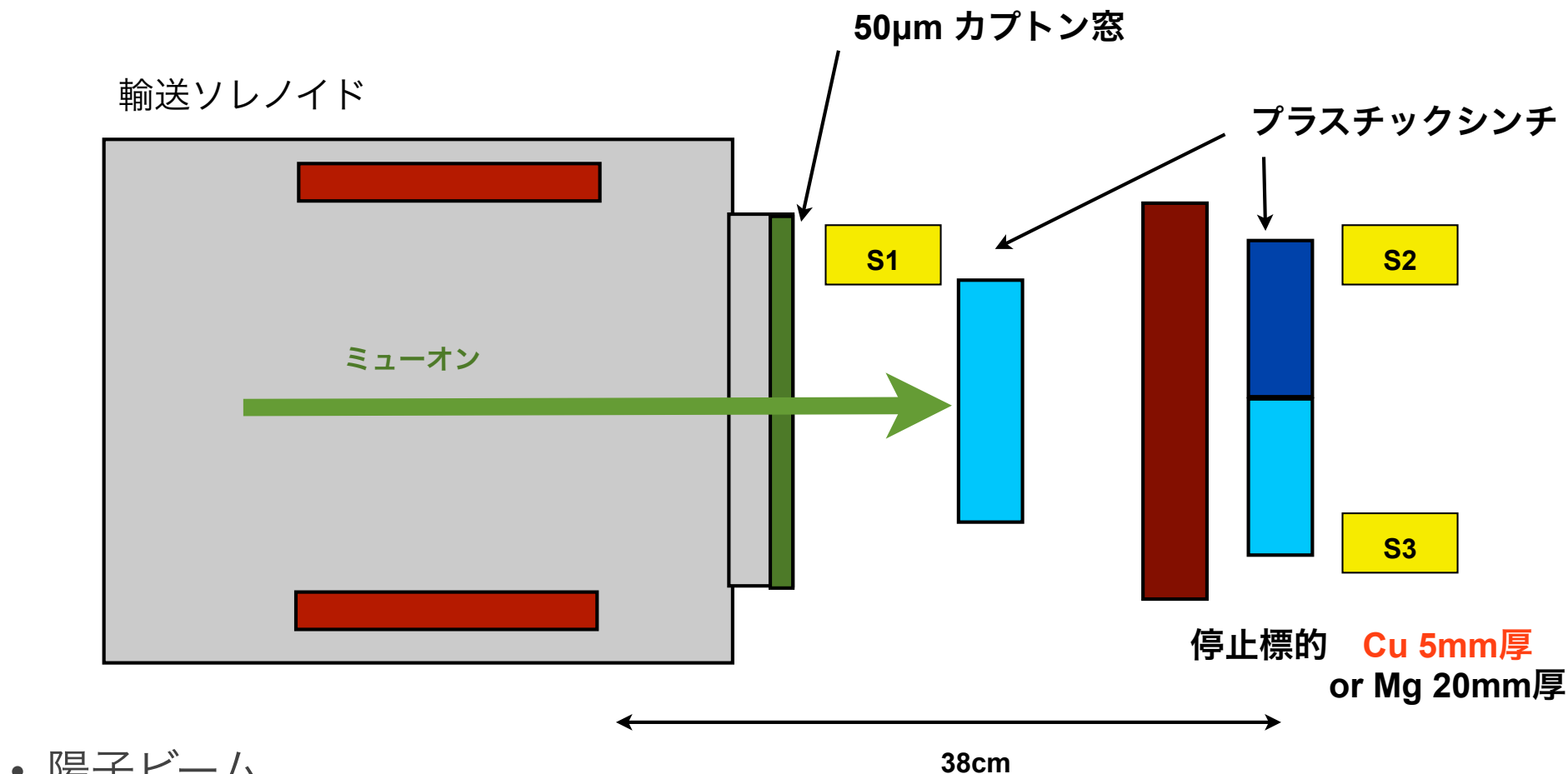
フルストップ
ファラデーカップ

SEC

フルストップ ファラデーカップ OFF時

フルストップ ファラデーカップ ON時

ミューオン寿命の測定



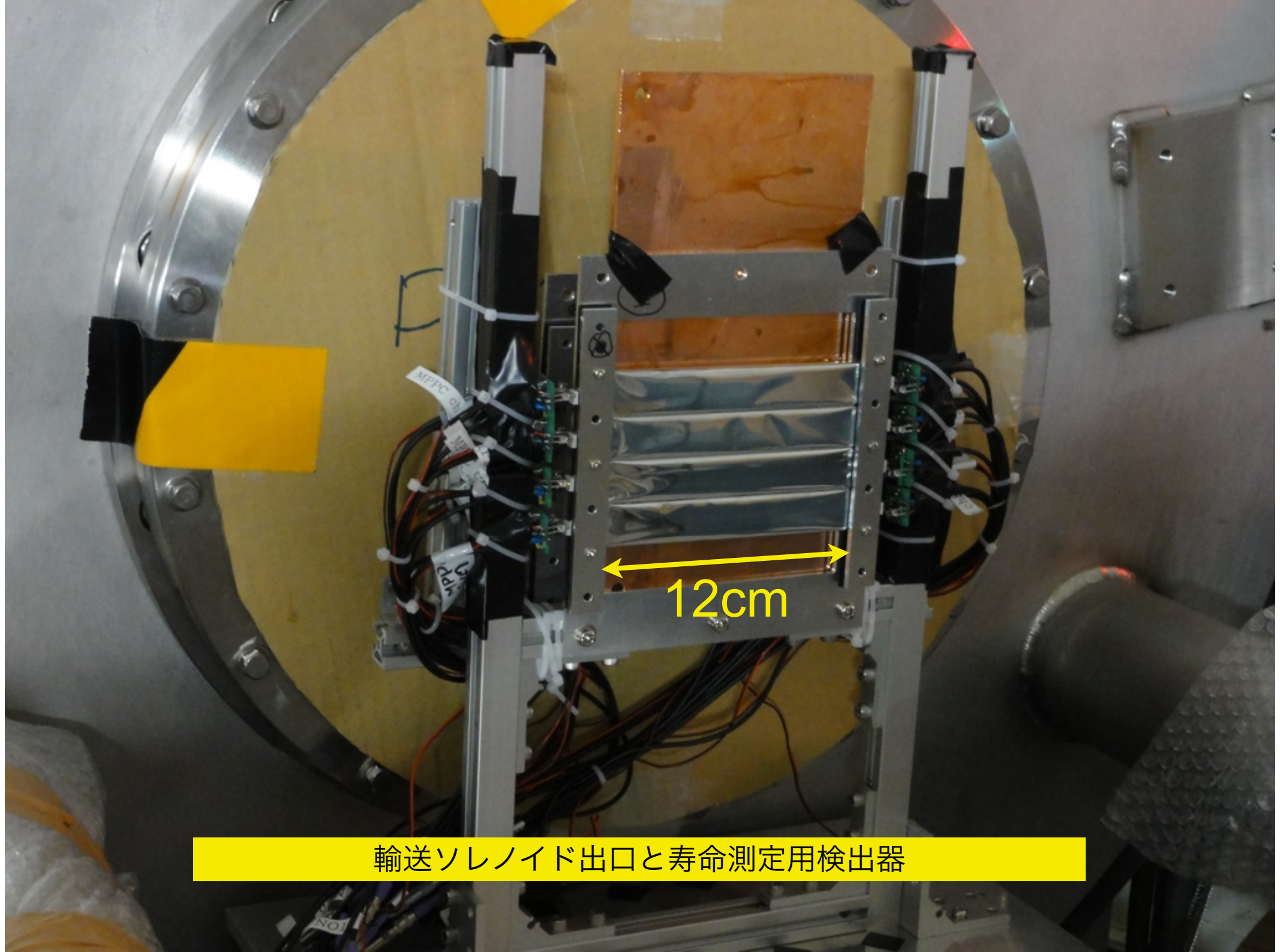
- 陽子ビーム
 - 392MeV, 約0.02nA
- TDC
 - スタート : S1 and !(S2 or S3)
 - ストップ : S1,S2,S3毎に測定

プラスチックシンチの大きさ

S1: 120mm x 60mm x t5mm
S2: 120mm x 40mm x t5mm
S3: 120mm x 40mm x t5mm

光センサー

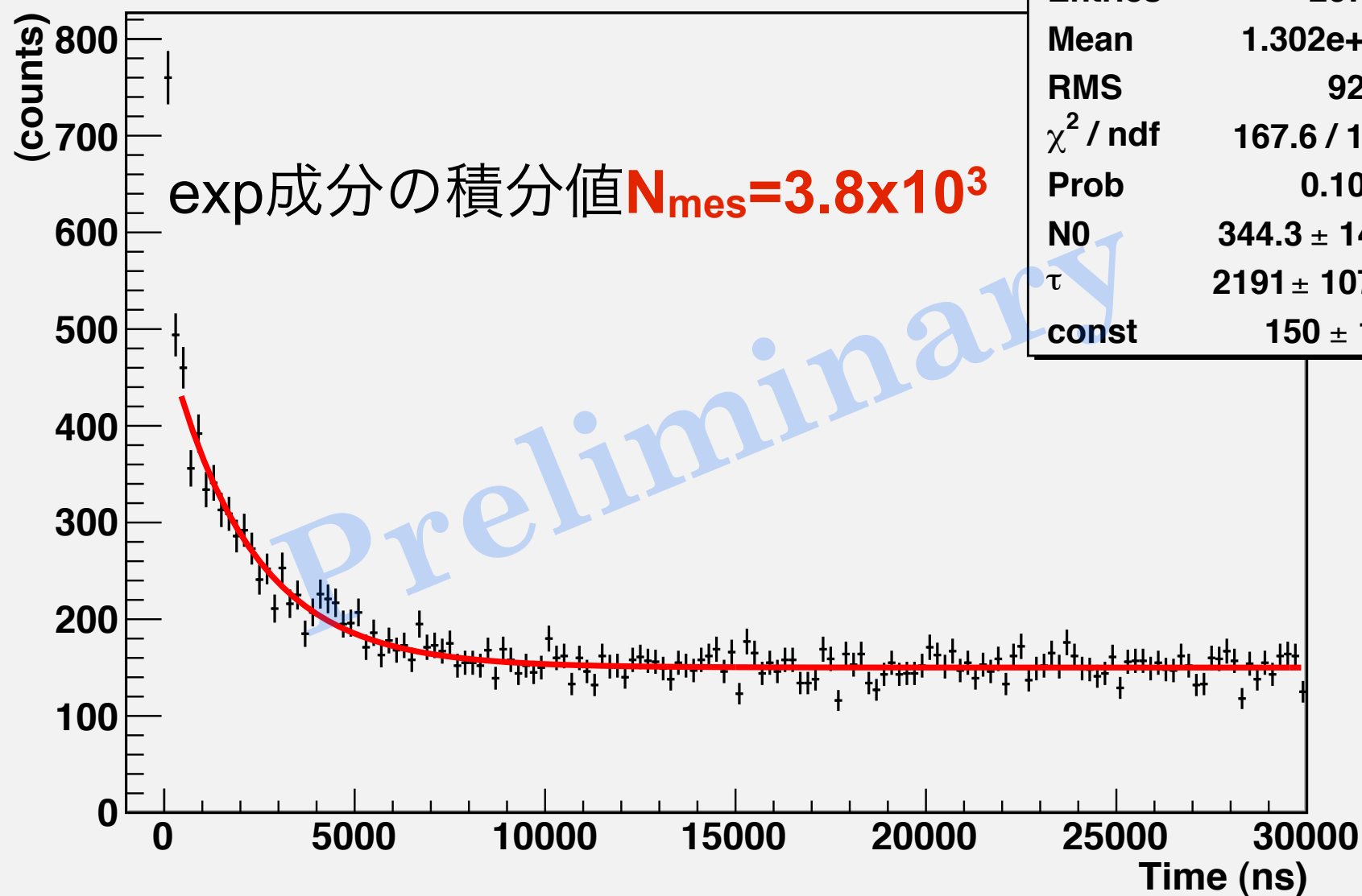
浜ホトMPPC: S10362-33-050C



輸送ソレノイド出口と寿命測定用検出器

Cu中のミューオン寿命測定

Muon Life in Cu : run170



陽子ビーム1 μ Aの場合のミュオン量の算出

- 陽子ビーム1 μ Aの場合のミュオン量 $N_{\mu(1\mu A)}[\mu^+/\text{秒 for } 1\mu A \text{ 陽子ビーム}]$
 - = **$N_{\text{mes}} (3.8 \times 10^3)$**
 - / 陽子ビーム電流値 (0.015nA / 1 μ A)
 - / データ収集時間(34x60秒)
 - / DAQのデータ収集効率 (0.03)
 - / トリガー検出器のアクセプタンス x 検出効率 ($12 \times 6 / 20^2 \pi \times 1 = 0.06$)
 - / 電子検出のアクセプタンス x 検出効率 ($1/4 \times 1$)
 - x 磁場減少の効果 ($2/0.4=5$)
 - $B \times R^2 = \text{一定}$
- **$> 1.4 \times 10^9 [\mu^+/\text{秒}]$ for 392MeV, 1 μ A 陽子ビーム**

赤字は控えめな見積もりなので、
収量はもっとあるはず。
シミュレーションで確認中

福田さんによれば、陽子ビームは10 μ Aまで増強可能—— $> 10^{10}$ muons/秒？

まとめ

- 大阪大学核物理研究センターで新しい大強度DCミュオン源MuSICの建設を進めている。建設は2009年度からの5カ年計画である。
- 将来のミュオン計画で重要な超伝導パイオン捕獲システム、超伝導ソレノイド輸送システムを世界で初めて建設、実用した。
- 2011年2月のビームテストにより、ミュオン収量が $1 \times 10^9 \mu^+/\text{sec}$ [for 392 MeV, 1 μA proton beam]以上であることが測定された。これは、世界最高のミュオン生成効率が達成されたことを意味する。
- 今後の予定
 - 陽子ビーム電流を1 μA に向かって上げ、問題ないことを確認する。
 - 輸送ソレノイド、ミュオン蓄積リングの建設
 - 実験設備、検出器の建設
- コラボレーター大歓迎中！