



MICE : ミューオンビームイオン化冷却 実証実験

- Overview and Status -

吉田誠 (大阪大学)
for the MICE Collaboration

2004/9/29 @ 高知大学



Contents

- イン트로ダクション
 - ニュートリノファクトリー
- MICE
- 冷却チャンネル R&D
- 粒子検出器 R&D
- まとめ

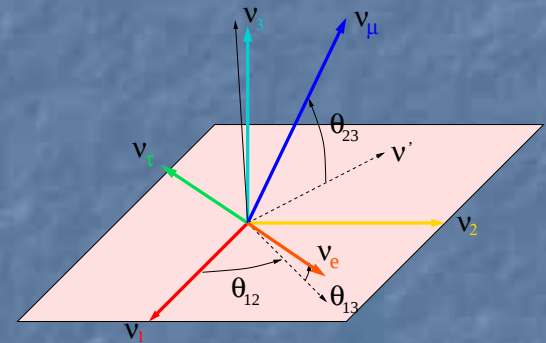


ニュートリノ振動

MNS Matrix

$$U = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

- Super-Kamiokande, K2K, SNO, KamLAND
などがニュートリノ振動の存在を確証した。
- θ_{13} はまだ測定にかかっていない
 - CHOOZ: reactor $\bar{\nu}_e$ disappearance
- より大強度のニュートリノビームが必要
 - スーパービーム ν_μ (MINOS, JPARCnu, ...)
 - ニュートリノファクトリー ν_μ, ν_e



MNS Matrix (LMA)

$$\theta_{12} \cong 20-45^\circ$$

$$\theta_{23} \cong 35-45^\circ$$

$$\theta_{13} < 10^\circ$$

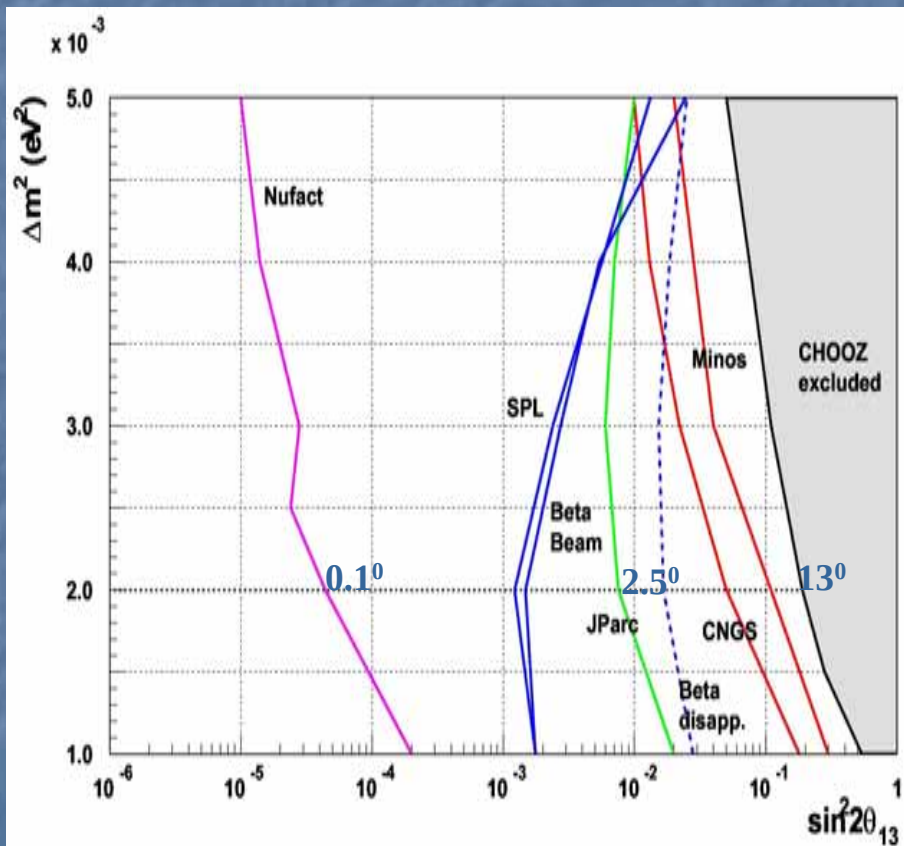
$$|\Delta m_{32}^2| \approx 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{21}^2| < O(10^{-4}) \text{ eV}^2$$

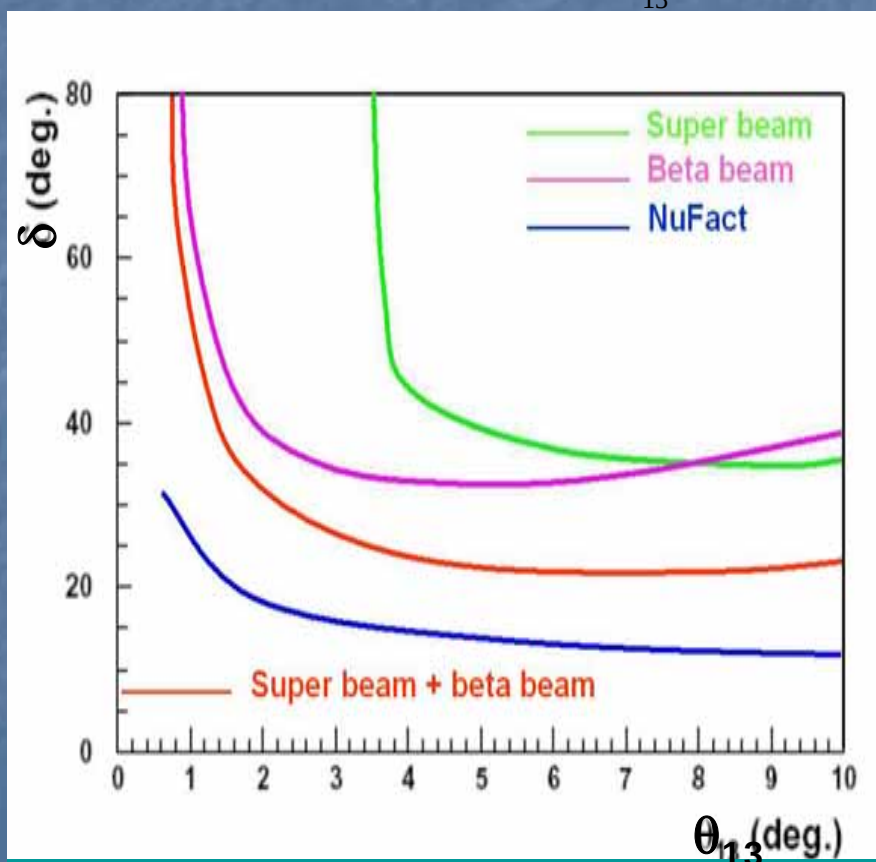


ニュートリノファクトリーの 期待される感度

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)}{P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) + P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_mu)} \\ \cong \frac{4 \sin 2\theta_{12} \cdot \sin \delta \cdot \sin(2\Delta m_{12}^2 L/4E)}{\sin \theta_{13}}$$



混合角 θ_{13}

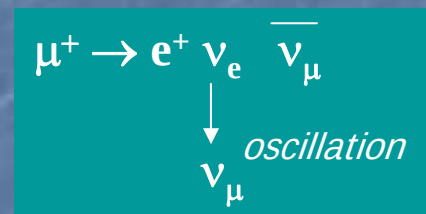


CPV角 δ

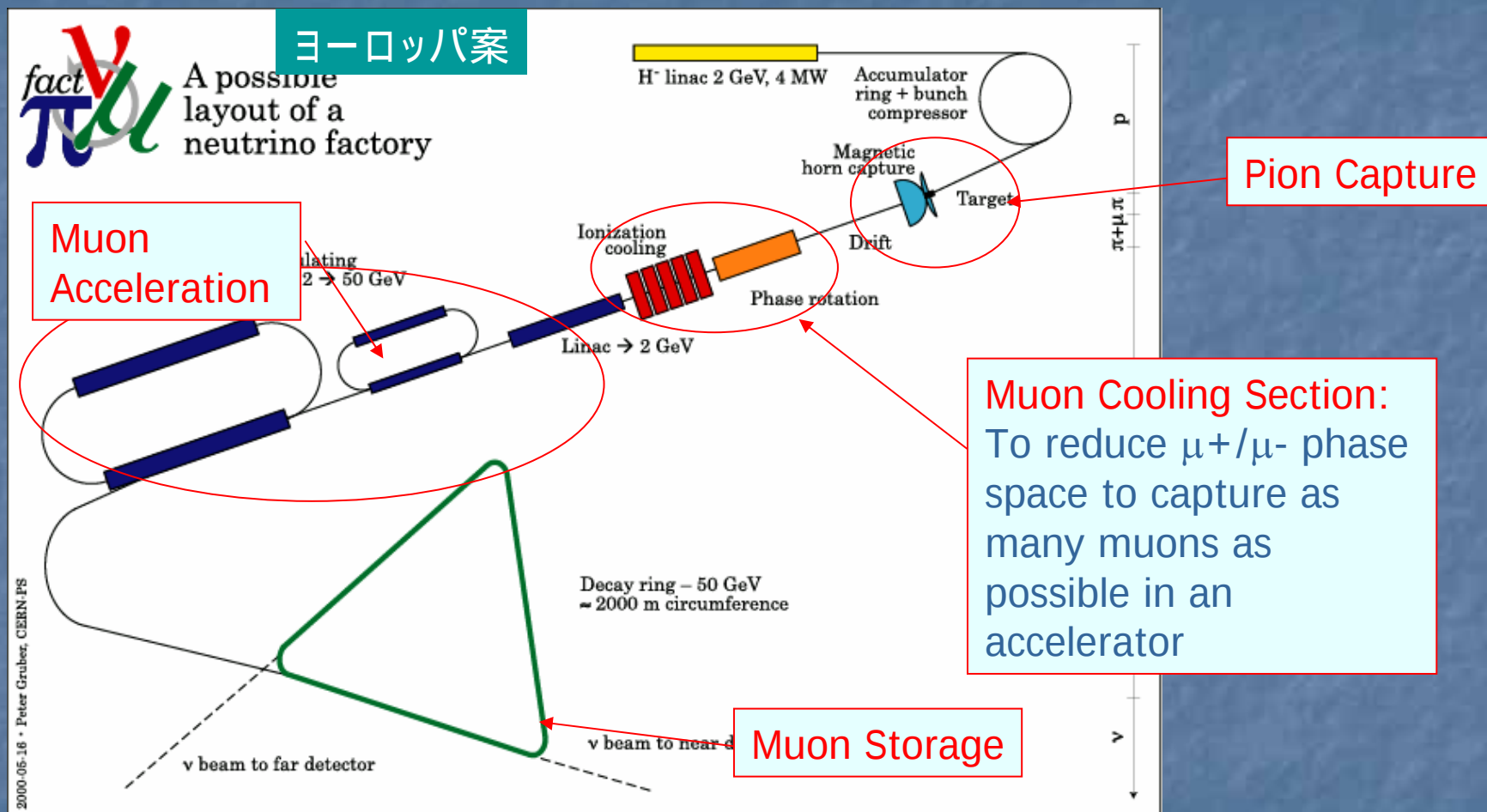


ニュートリノファクトリー概要

- 日本、ヨーロッパ、アメリカで検討中
- ミューオンを加速し($\sim 20\text{GeV}$)、蓄積リングにためて、崩壊ニュートリノ $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ ($\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$)を使う
 - 単一エネルギー
 - ν_μ のdisappearanceと同時に、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 振動も探索可
- 大強度ミューオンビームを使った物理
 - Muon rare decay ...
 - ミューオンコライダー
- 大強度、高エネルギーニュートリノビーム
 - $> 10^{20} \nu / \text{yr}$
- ニュートリノ混合パラメータの測定
 - $P(\nu_{\mu,e} \rightarrow \nu_x)$ の高精度測定
 - 質量差の測定
 - MSW効果の確認
 - 混合角の決定
 - レプトンセクターでのCP非保存現象の探索



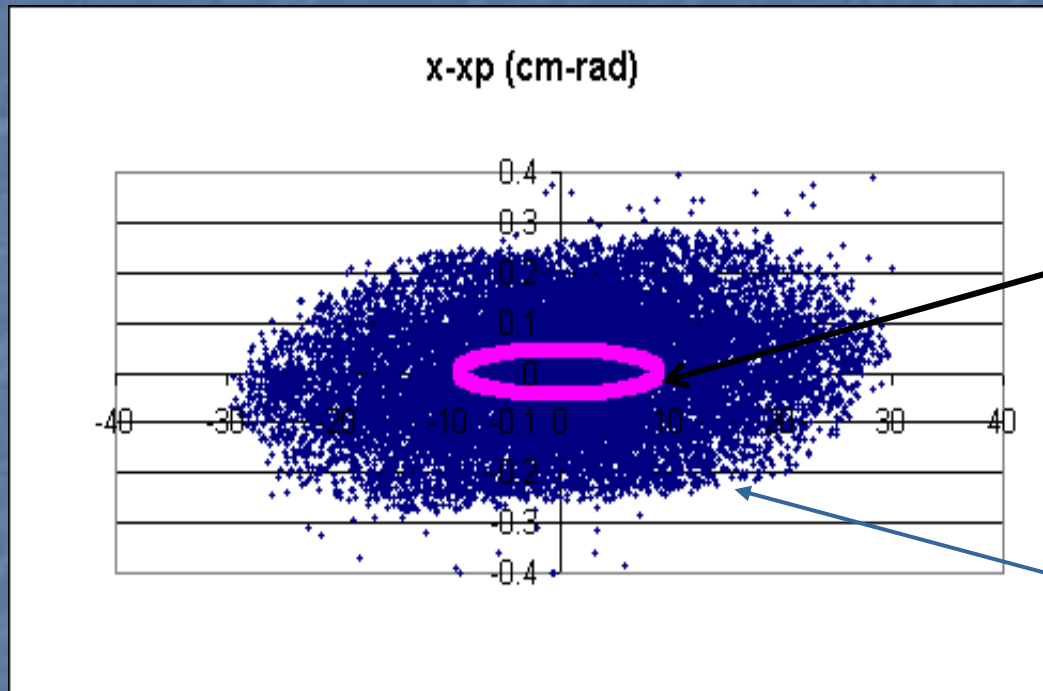
ニュートリノファクトリーコンポーネント



課題

- 大強度陽子加速器
- パイ粒子捕獲効率の改善
- ミューオン加速、蓄積におけるロス

ミューオンビームのエミッタンス



Accelerator acceptance

$R \approx 100\text{mm}$, $x' \approx 50\text{mrad}$
rescaled @ 200 MeV

π and μ after
focalization

ミューオン加速器に入射するためにエミッタンスを減らす必要がある。

- エネルギーの広がり → 位相空間回転 (Phase Rotation)
- 横方向エミッタンス → **ミューオンビーム冷却** (4~10倍のyield)

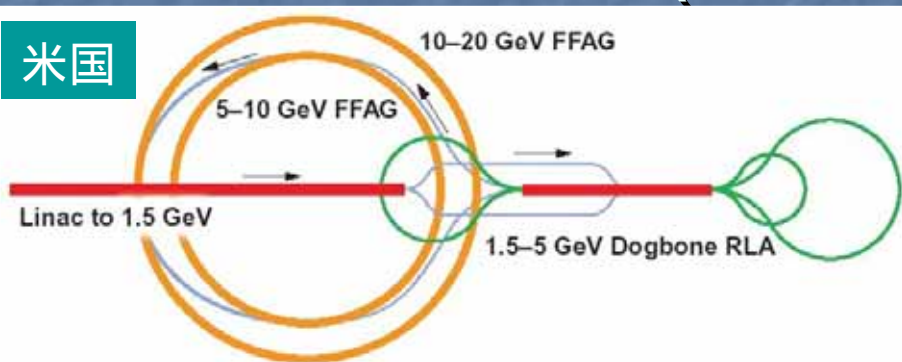
大アクセプタンス加速器の開発

- FFAG (Fixed Field Alternating Gradient synchrotron)



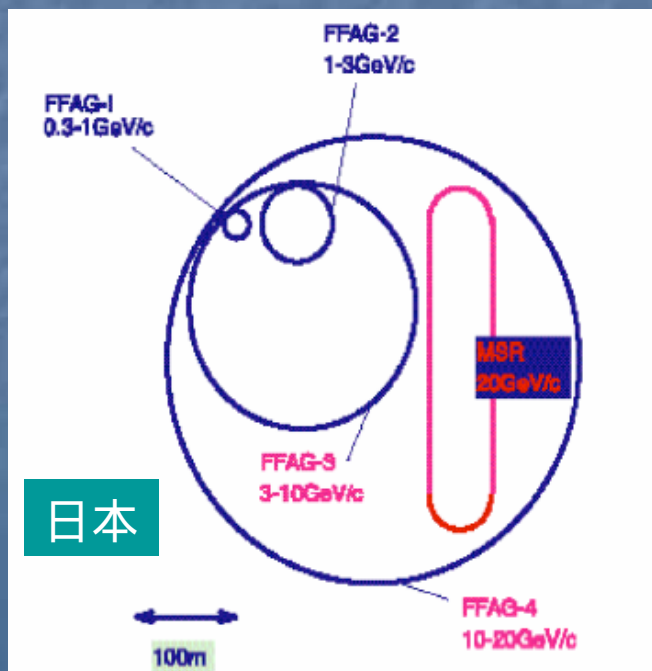
ニュートリノファクトリー計画 (日本・米国)

米国

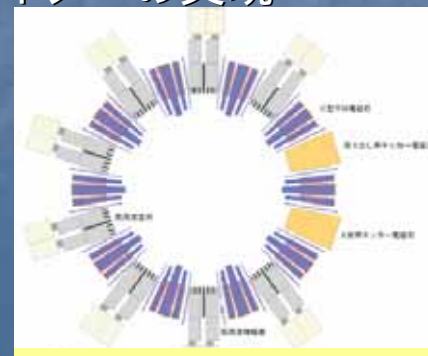


- 大アクセプタンスのFFAG を用いて
ミュオンを加速
 - 低コスト・高繰り返し可
- 前段(PRISM: Phase Rotated Intense Slow Muon source)で大強度、高輝度ミュオンビームが得られる(日本)
 - ミュオン物理($\mu \rightarrow e$ conv., etc.)
- ミュオンビーム冷却によって
 - コンパクト化・加速性能の向上・蓄積ロスの低減
 - ミュオンコライダーの実現

日本

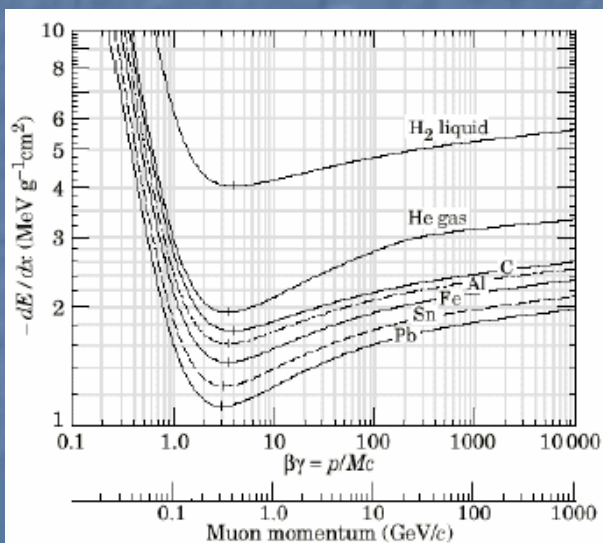
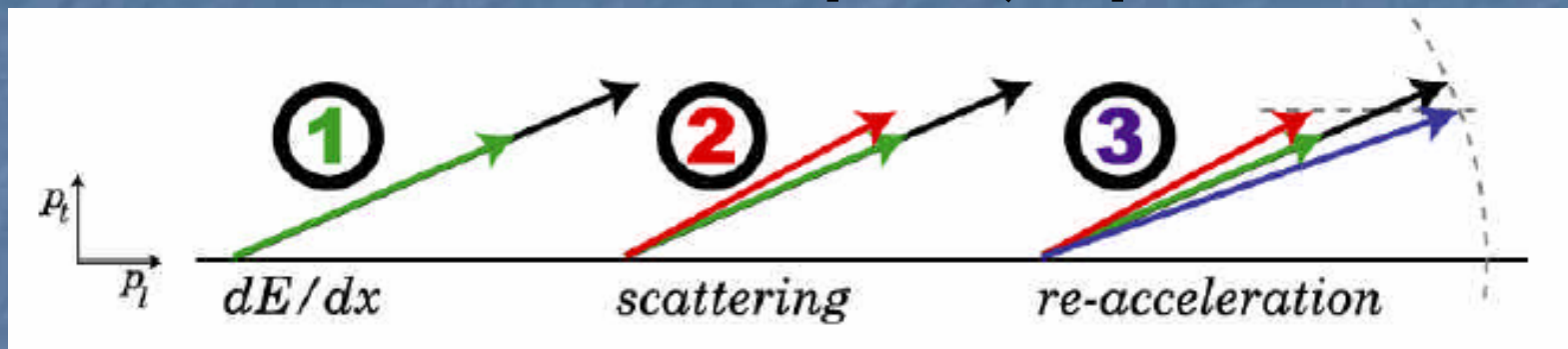


150-MeV Proton FFAG



PRISM ring layout

イオン化冷却



- 減速 (p_t および p_l) と加速 (p_l) を繰り返しエミッタンスを減らす
- 利点:
 - 素早い冷却 (ミューオンの寿命 $\sim 2\mu\text{s}$)
 - 電荷符号に依らず適用可
- 多重散乱による p_t の増加
 - 放射長 X_0 を大きくする

$$\frac{d\varepsilon_n}{ds} \approx -\frac{1}{\beta^2} \left\langle \frac{dE_\mu}{ds} \right\rangle \frac{\varepsilon_n}{E_\mu} + \frac{1}{\beta^3} \frac{\beta_\perp (0.014)^2}{2E_\mu m_\mu X_0}$$

Approximation of the cooling relation



MICE概要

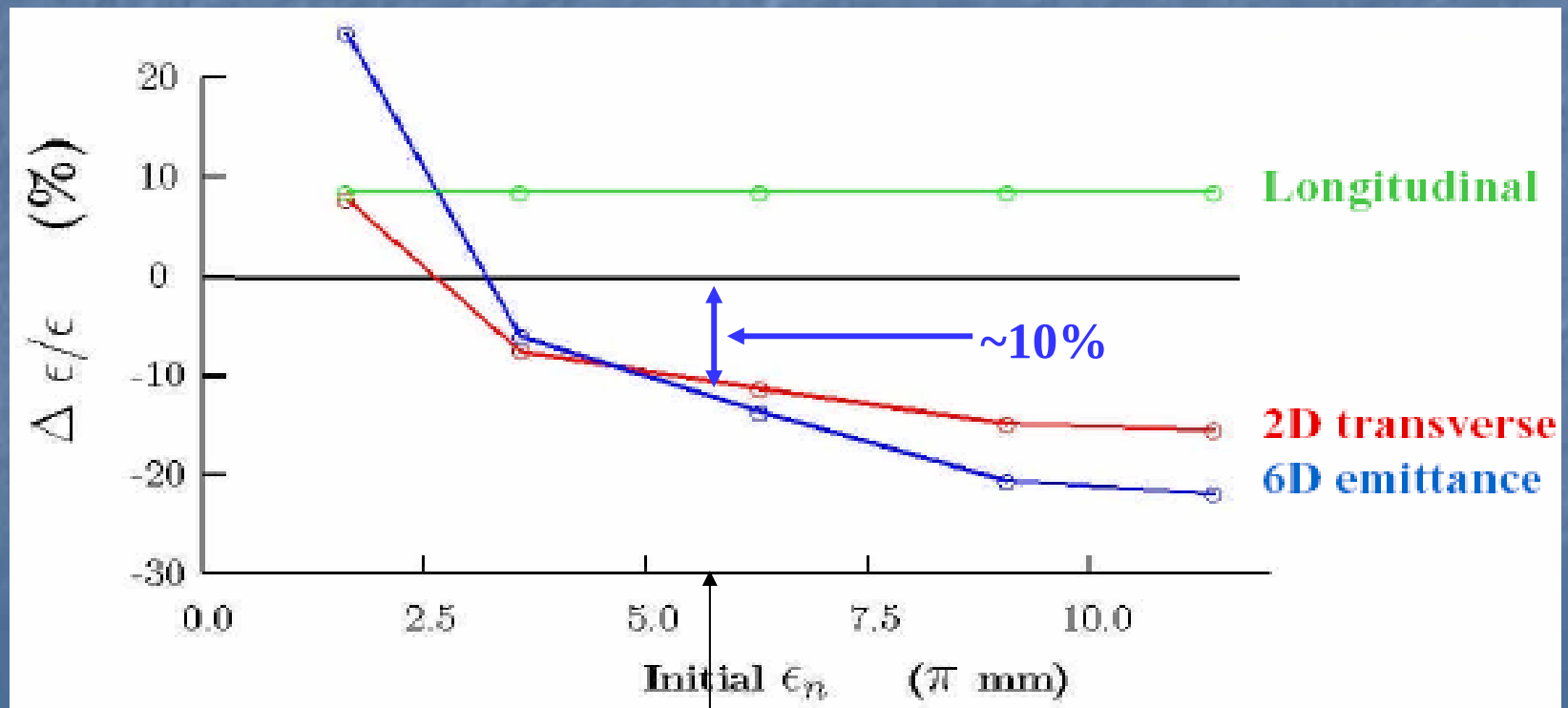
(Muon Ionization Cooling Experiment)

- ミューオン加速・蓄積に必要なイオン化冷却を実証する
- 素早い冷却のために
 - 高電場加速空洞の開発
 - $\sim 10\text{MV/m}$
 - 低い周波数 (200 MHz)
 - 軸方向アクセプタンスを確保する
 - 液体水素減速材
 - 多重散乱によるエミッタンスの増加を抑える
 - 安全な冷却装置の開発
 - ビームウインドウの改良
- 冷却前後でエミッタンスの減少を確認する測定器を置く
 - 0.1%の精度でエミッタンスを測定する
- 冷却用コンポーネントの製作可能性のチェック
- 運転時のバグ出し、最適化



MICEの目標(冷却チャンネル)

- ミューオンビーム冷却チャンネルを建設する。
- 冷却によるエミッタンスの変化が十分測定可能であることが必要。
 - 液体水素減速材 (dE/dx が大きい)
 - 高加速勾配RF空洞 (短い距離で冷却)
 - 横方向エミッタンスを10%させる



nominal input emittance

Curves for 23 MV, 3 full absorbers¹¹

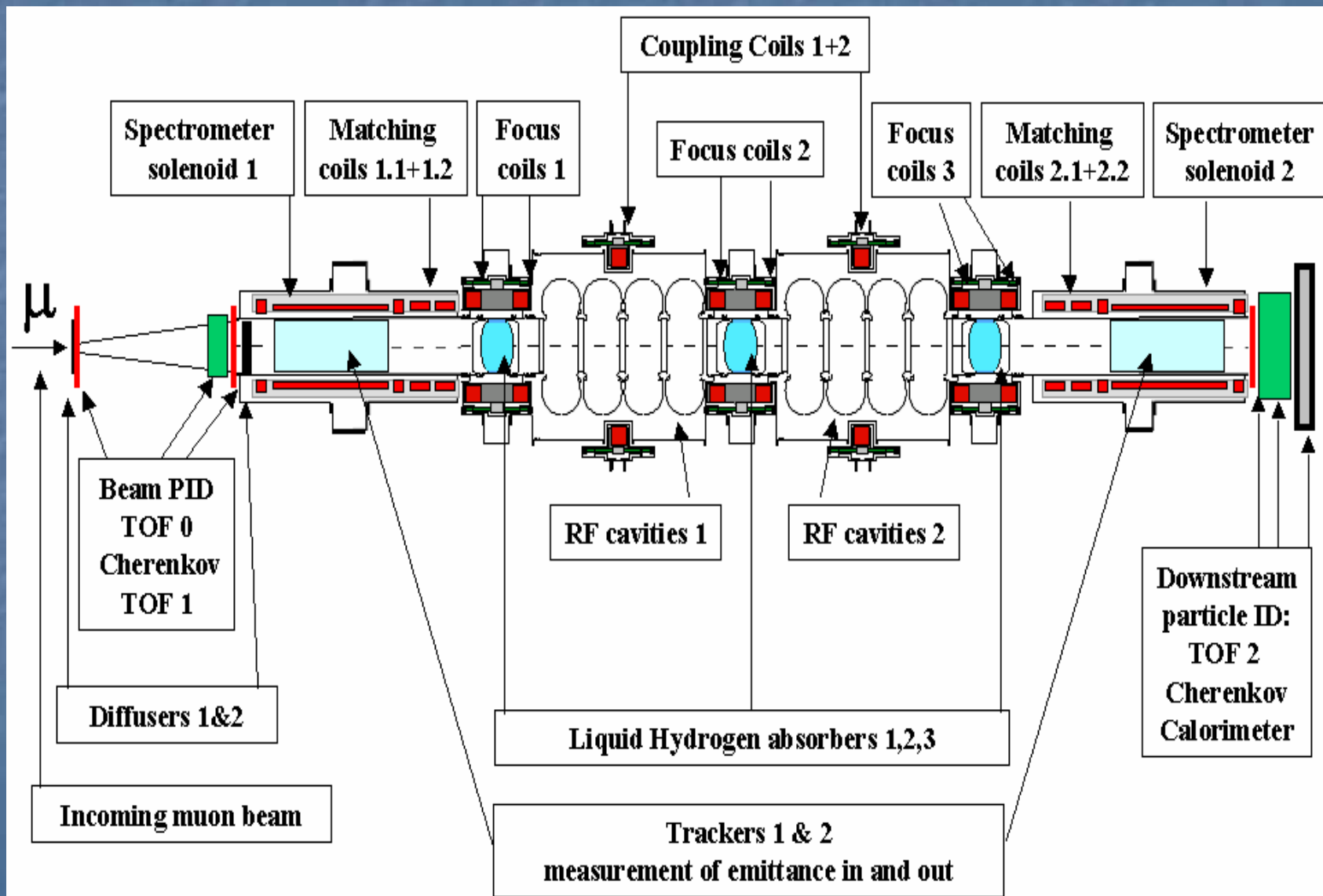


MICEの目標(測定器)

- 10%のエミッタンスの減少を1%(絶対値で0.1%)の精度で測定する。
 - 冷却チャンネルの前後におけるエミッタンスを0.1%の精度で測定できるスペクトロメータ
 - 一粒子ごとに飛跡を検出
 - バックグラウンドパイ粒子・電子を除くためのPID検出器
- 粒子検出器群と冷却チャンネルを統合する
 - 多重散乱を防ぐため検出器内部の物質量を減らす
 - 高磁場、高バックグラウンド条件下で安定に動作すること



MICEセッティングアップ





MICE コラボレーション

国際共同：37機関

ヨーロッパ

Louvain la Neuve, Saclay, Bari, LNF Frascati, Genova, Legnaro, Milano, Napoli, Padova, Roma III, Trieste, NIKHEF, Novosibirsk, CERN, Genève, ETH Zurich, PSI, Brunel, Edinburgh, Glasgow, Imperial College, Liverpool, Oxford, RAL, Sheffield

日本

KEK, Osaka University

アメリカ

ANL, BNL, FNAL, IIT, Chicago Enrico Fermi Inst., LBNL, UCLA, NIU, Mississippi, Riverside



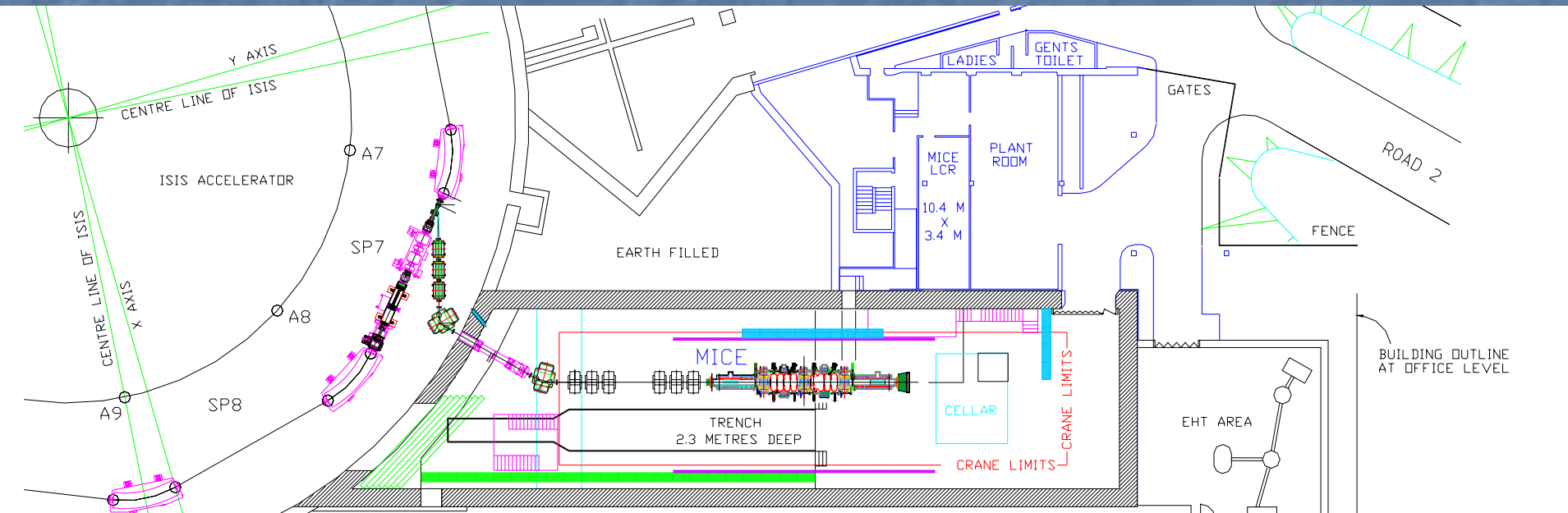
ヒストリー

- 2001年: NuFact'01において提案
- 2002年: Letter of Intentを英国ラザフォード研究所 (RAL) に提出
- 2003年1月: Proposal をRALに提出
- 2003年3月: 国際レビュー委員会から “strongly recommended” と評価される
- 2003年10月: CCLRC chief executiveが計画の重要性を承認
- 1st UK Project Review (Gateway)
- 英国、日本、米国において財源確保の交渉中
- 2004年末: 2nd UK Project Review



ビームライン・実験ホール

– layout and progress this year



■ MICE用ビームライン@RAL:

- 加速器と実験ホール間のシールドをインストール済み
- 2006年のISISシャットダウン中にビームラインを完成する予定

M L S
FCC APPROVED TO LBS 4007



MEGA FILM
FLAME RETARDANT
TEMPORARY PROTECTION
EX. 10425 201184

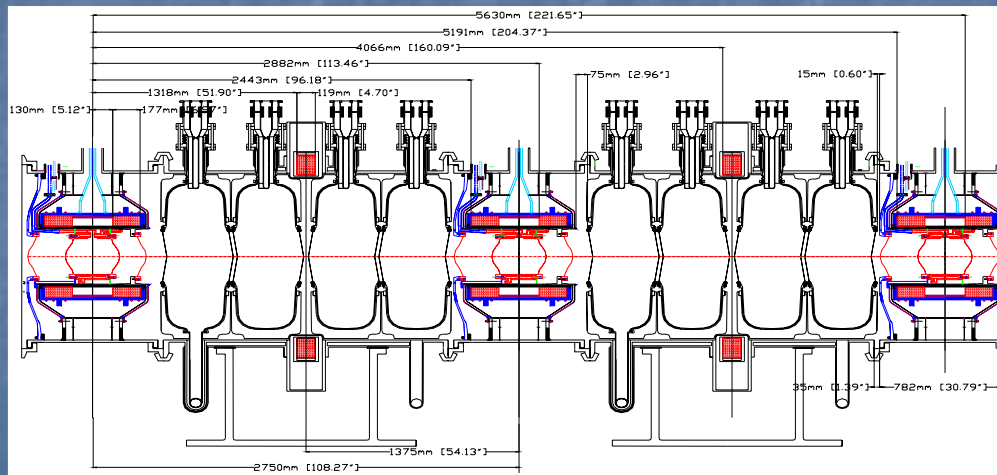
MEGA FILM
FLAME RETARDANT
TEMPORARY PROTECTION
EX. 10425 201184

1500
1692



冷却チャンネル

- 液体水素減速材
 - ビームの加熱を抑えるため放射長の大きい水素を使う
 - 超伝導収束ソレノイド
 - ビームの広がりを押さえるため
 - 高勾配加速空洞
 - エミッタンスを10%減らす → $\sim 20\text{MV}$ (200MeV ミューオン)
- コンパクトで経済的な冷却チャンネルの設計



- 3 Liquid Hydrogen absorbers
- 8 cavities
201MHz RFs, 8MV/m
- 5T SC solenoids

液体水素減速材R&D (MUCOOL/KEK)

- 対流型減速材モジュール
 - MTA/FNALにおいてヘリウムガスを用いた冷却運転試験に成功



KEK absorber II



KEK test cryostat sitting in MTA/FNAL



冷却チャンネルコンポーネント R&D

減速材ウインドウ
(IIT, NIU, ICAR)

Thin windows + safety regulations



MUCOOL 201 MHz RFモジュール
(Berkeley, Los Alamos, JLAB, CERN, RAL)



First cavity
has been
assembled

Be window
to minimize
thickness



測定器: コンポーネント

■ 粒子種識別

■ 冷却チャンネル上流:

$\pi - \mu$ 選別

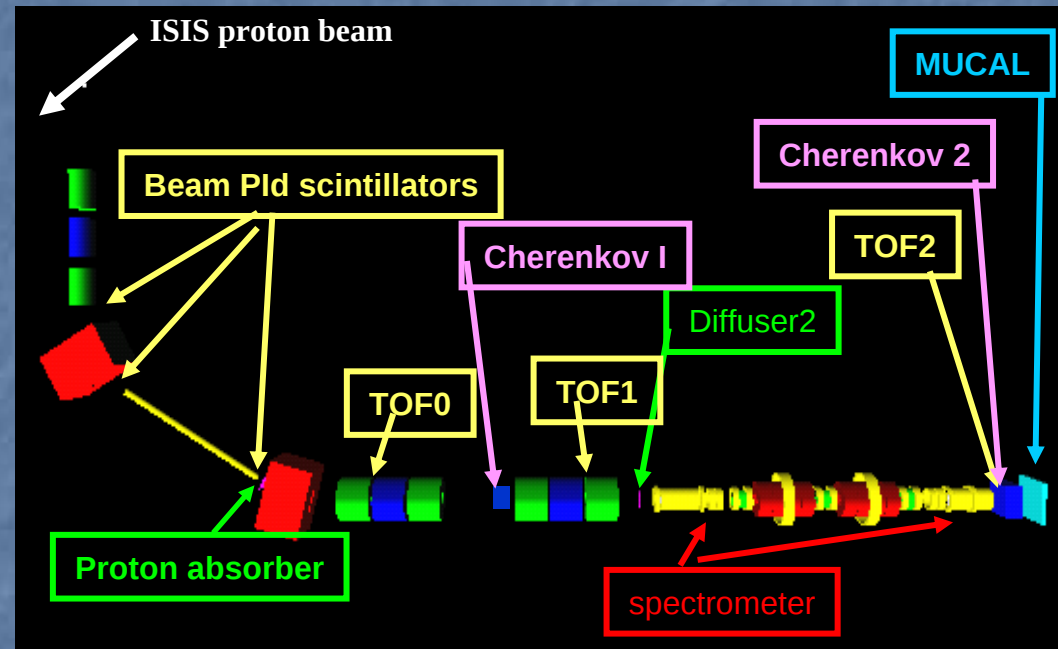
- TOF測定器
- チェレンコフ検出器

■ 下流: $\mu - e$ 選別

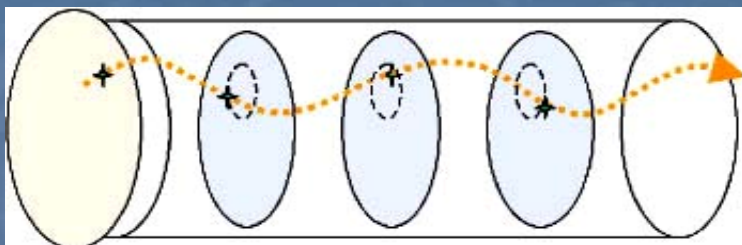
- チェレンコフ検出器
- 電磁カロリメータ

■ スペクトロメータ:

- 位置, 運動量, エミッタンスの測定



スペクトロメータ



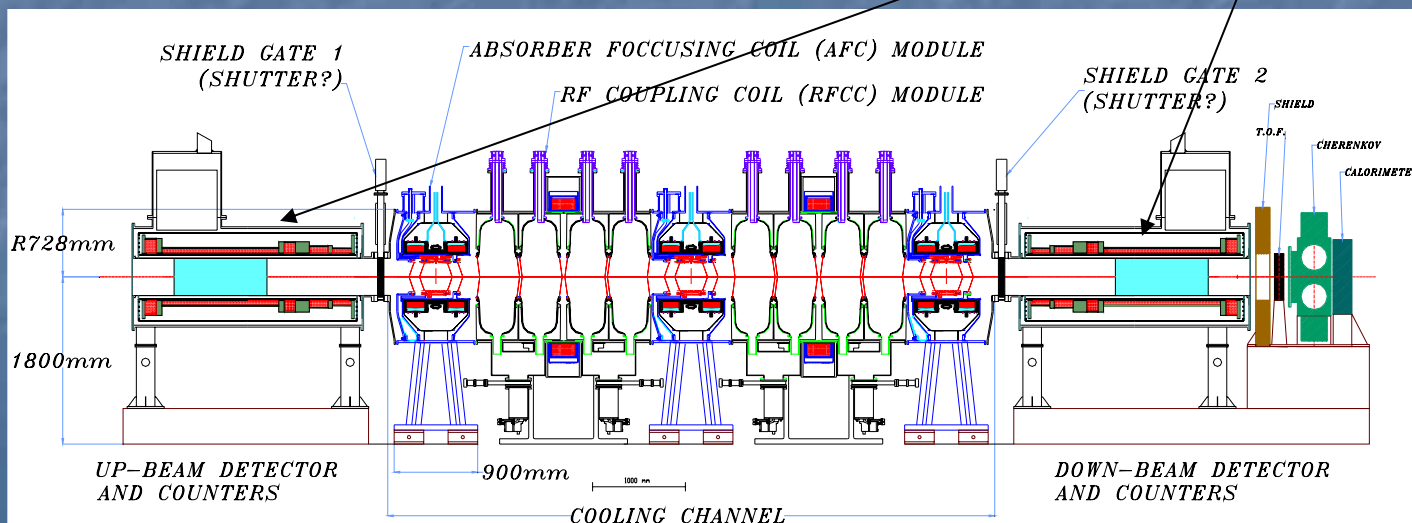
- 4 Teslaソレノイド磁場中に置く。
- 粒子の螺旋軌道を再構成しエミッタンスを測定する

要求される性能

- ミューオンエミッタンスの測定誤差 $< 0.1\%$
- 悪環境で安定動作
 - 高磁場
 - RF空洞からのX線バックグランド
- 低物質質量

Spectrometer Solenoid:

- 4T magnetic field
- 40cm bore

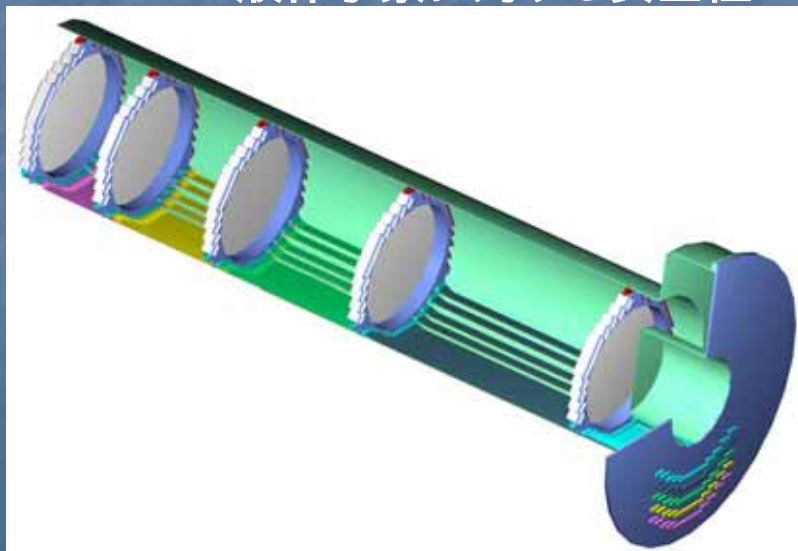




ミューオン飛跡検出器

シンチレーションファイバー飛跡検出器 (SciFi)

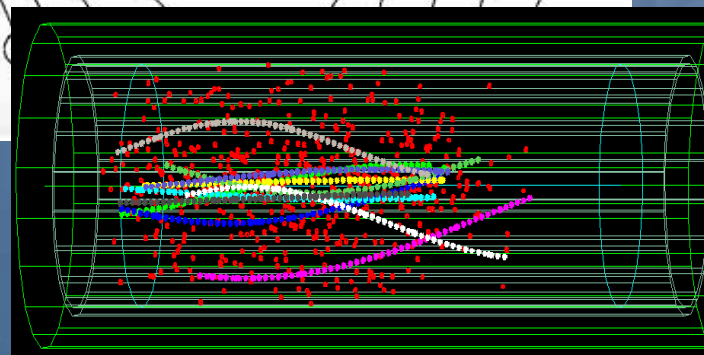
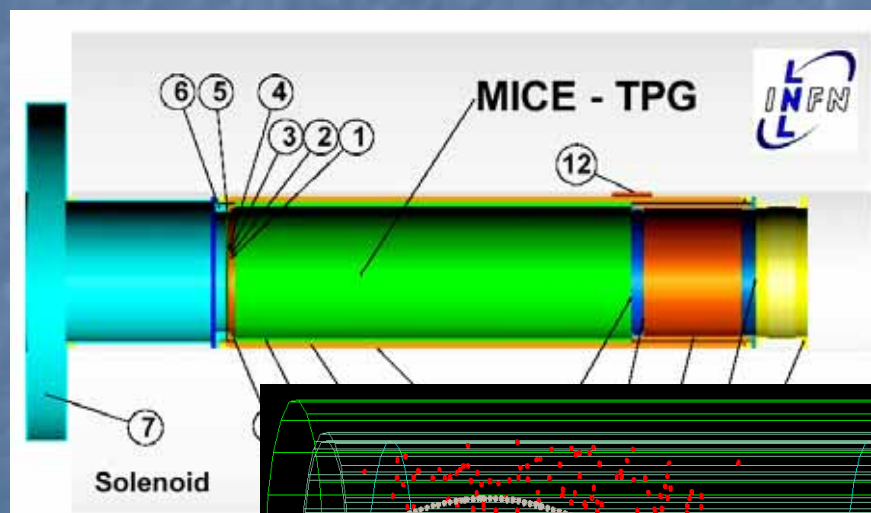
- 極細350 μ mシンチファイバーを使用 (0.35 % X_0)
- 光量が少ないためVLPC (QE $\sim$ 80 %) で読み出し
 - ・ファイバーに3HF蛍光体
- スペクトロメータからエレキ、電源を離すことができる
 - 液体水素に対する安全性



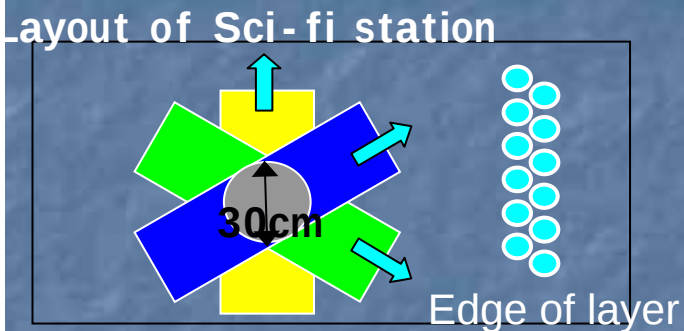
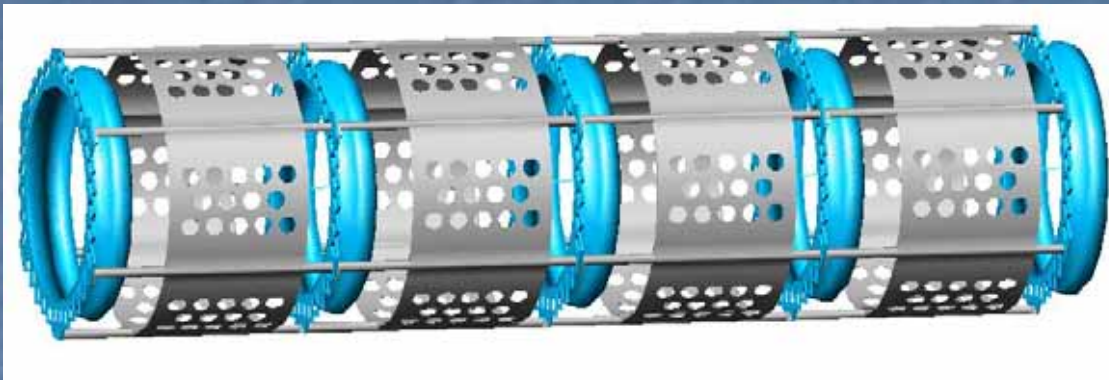
Alternative option:

TPC with GEM readout (TPG)

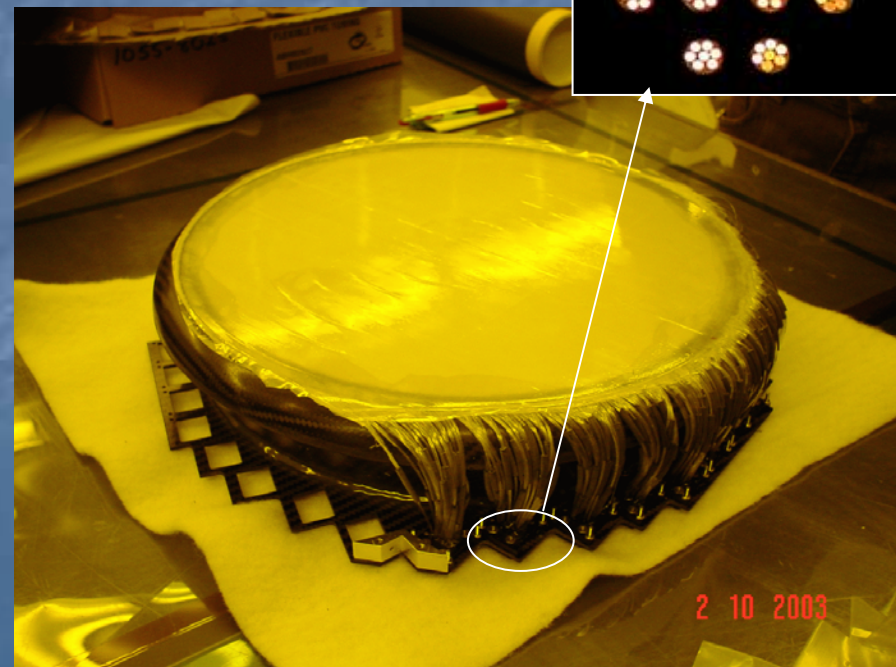
- 低物質質量 (0.15 % X_0)
- 多数の点を検出して飛跡を再構成
 - エミッタンスの測定精度を上げられる可能性
- GEMにおけるX線バックグラウンドの影響



SciFi 飛跡検出器



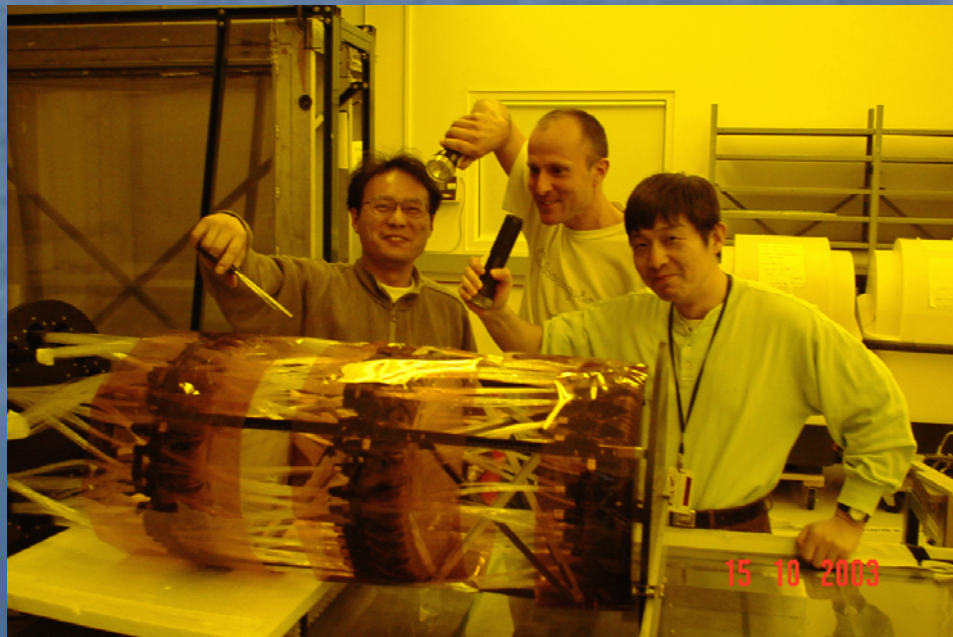
- 5 SciFi Station
- Station は 3 view (V,X,W) から成る。それぞれのviewは 120° の角度で重ねる。
- 1 view は 1491 本の 350ミクロンファイバーから成る。
 - 420ミクロンピッチ / 2層俵積み
 - 7本ずつ (1.5mm幅) まとめ読みしてエレキのチャンネルを減らす。
- 4m長クリアファイバーでVLPCまで導く





SciFi飛跡検出器プロトタイプ建設 (D0/FNAL test stand)

The prototype with 3 stations was constructed at the D0 test stand in Oct. 2003 in collaboration with JP, UK, and US

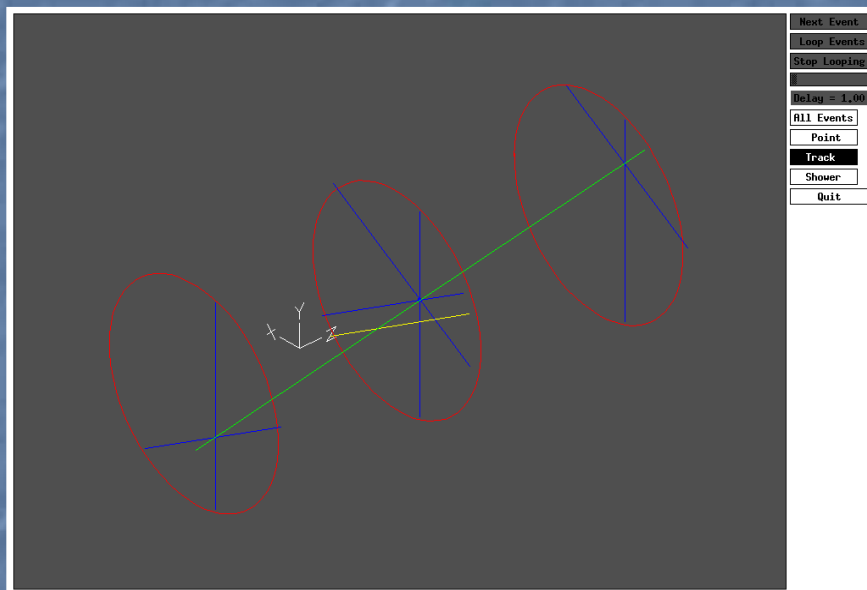


Prototype sitting at D0 test stand

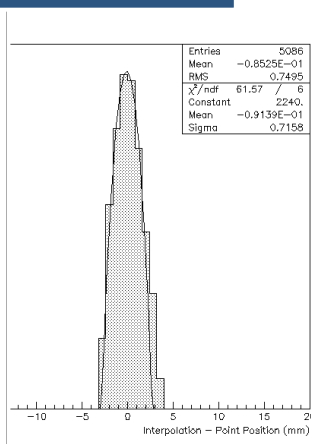
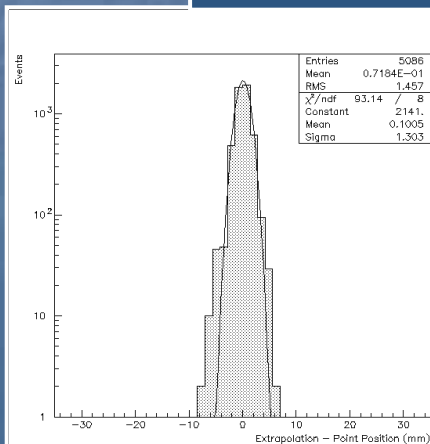


SciFiプロトタイプの性能 (宇宙線テスト)

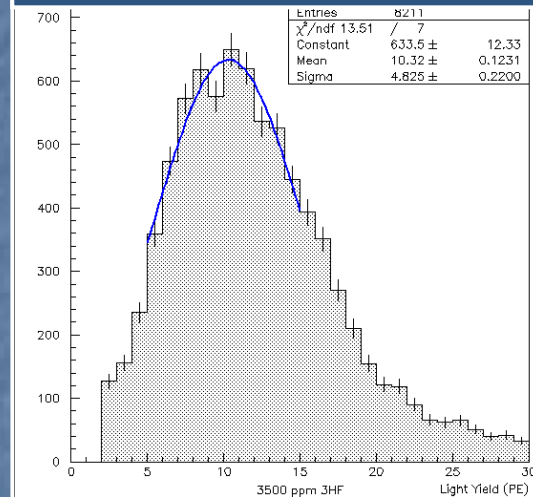
宇宙線ミュオンのイベント例



Point resolution $\sim 440 \mu\text{m}$



Light yield $\sim 10\text{p.e.}$ at most probable



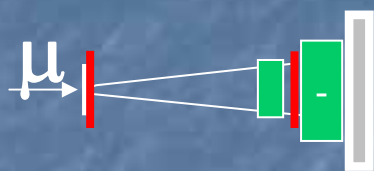
$\rightarrow \epsilon > 99\%$

ビームテスト:

- KEK-PSにおけるプロトタイプの試験を検討中
- SCソレノイド磁場中での飛跡検出(パターン認識、運動量測定)を目指す
- 本番用検出器製作方法の最終チェックのため、4面めを製作中

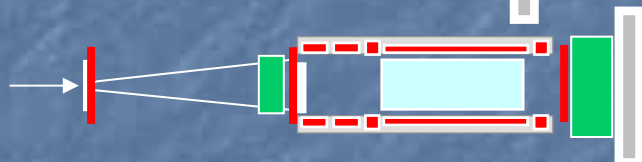


インストールスケジュール



STEP I

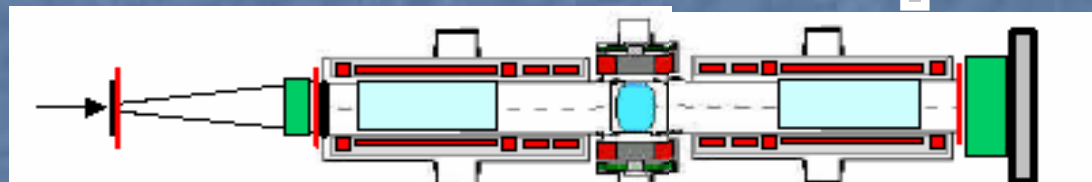
2006



STEP II

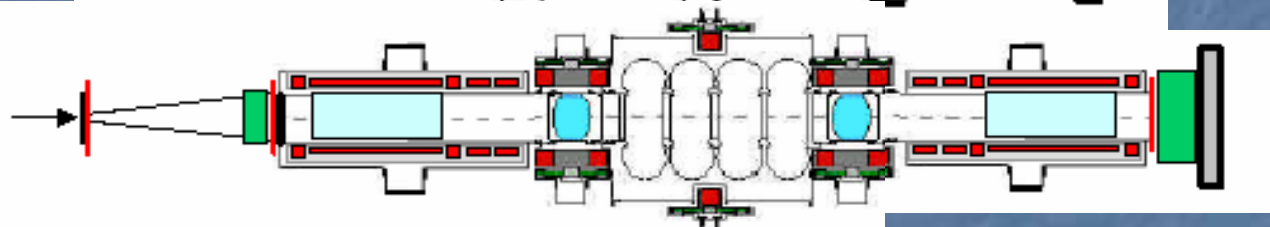


STEP III

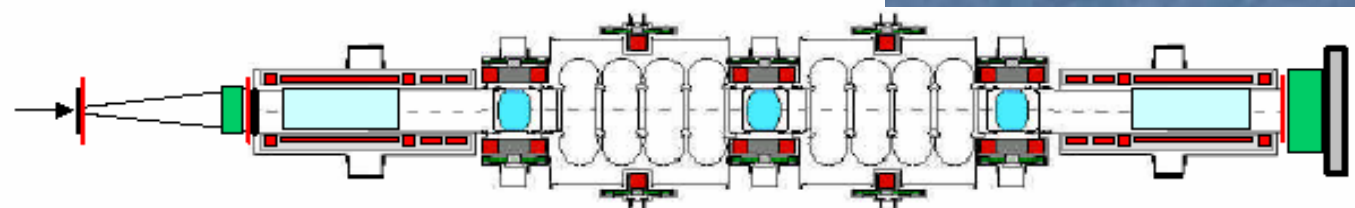


STEP IV

2007



STEP V



STEP VI

2008

まとめ

- MICE用ビームラインの設計はほぼ完了。
- RALにおいてビームライン、実験ホールの整備が始まっている。
- 液体水素冷却材モジュール運転試験およびRF空洞のR&Dが進行中。
- PIDシステムの詳細設計完了。
- 飛跡検出器R&D
 - Baseline option : シンチレーションファイバー飛跡検出器 (SciFi)
 - プロトタイプを製作。宇宙線の検出に成功。
 - ソレノイド磁場中の性能評価のため、2005年にKEKビームテストを検討中