

中性子の将来計画

—中性子電気双極子モーメント探索実験—

京都大学原子炉実験所 北口雅暁

東大素粒子国際センター 山下 了

九大理 吉岡瑞樹

京大理 今城想平 京大化研 岩下芳久

KEK 三島賢二、有本靖、清水裕彦

and NOP collaboration

中性子電気双極子モーメント

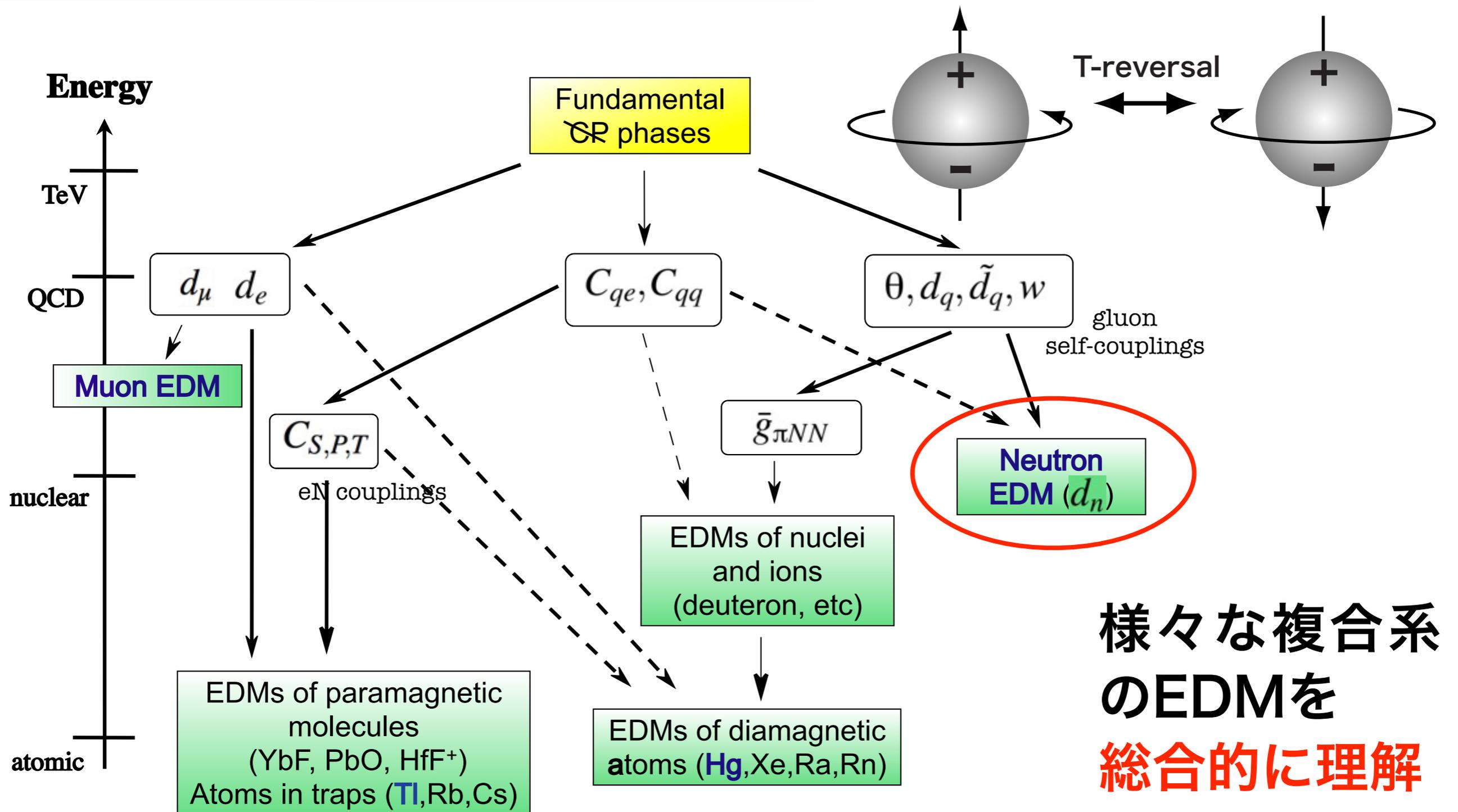
CPの破れの理解→beyond standard
のために EDM の探索・研究が必要

nEDM at J-PARC

nEDM測定精度を向上するには
J-PARC UCN の特徴と、開発の現状

まとめ

中性子電気双極子モーメント

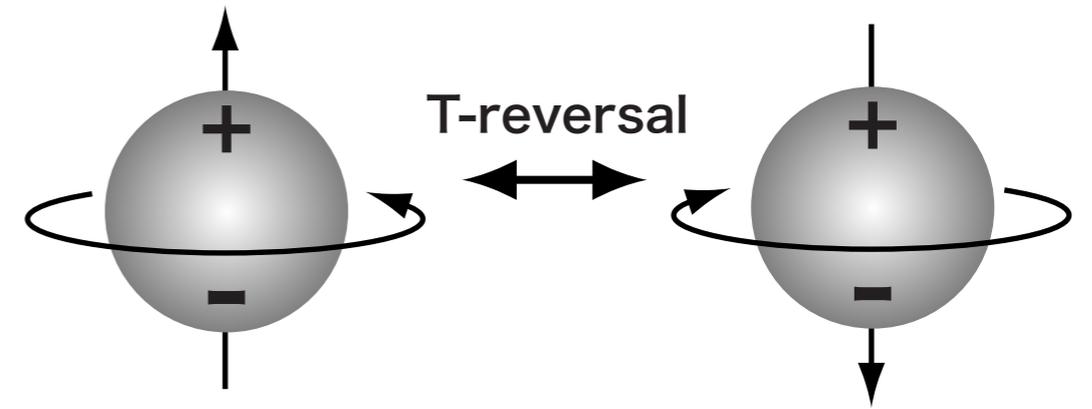


様々な複合系のEDMを
総合的に理解

Pospelov Ritz, Ann Phys 318 (05) 119

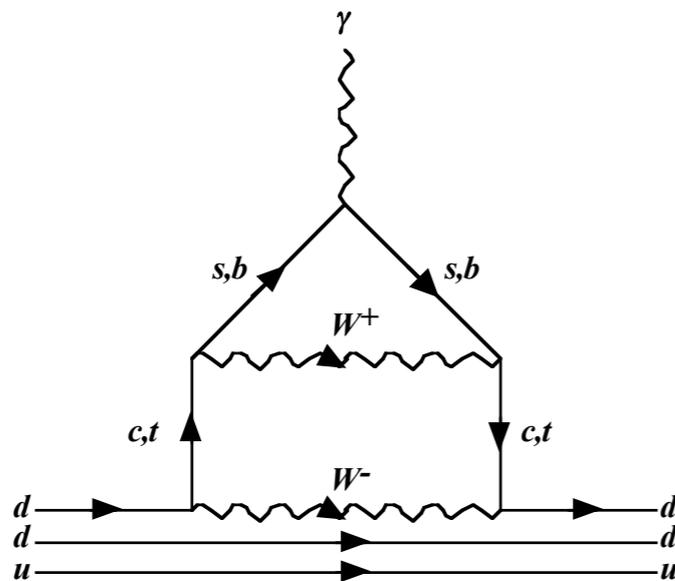
中性子電気双極子モーメント

中性子に電気双極子モーメントがあると、時間反転対称性が破れていることになる



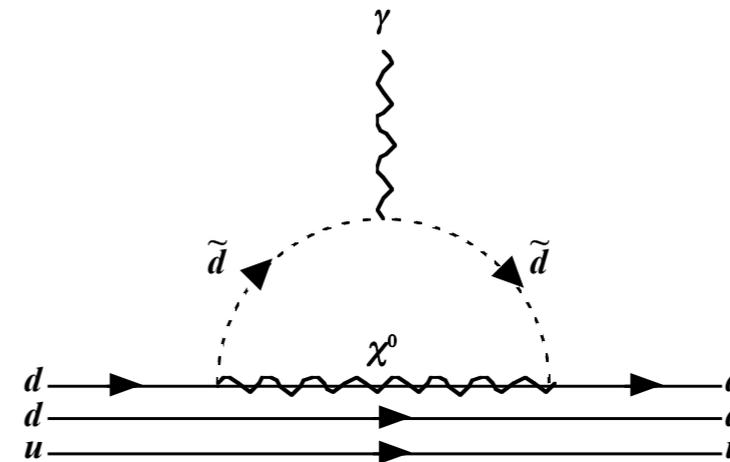
標準模型

$10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$

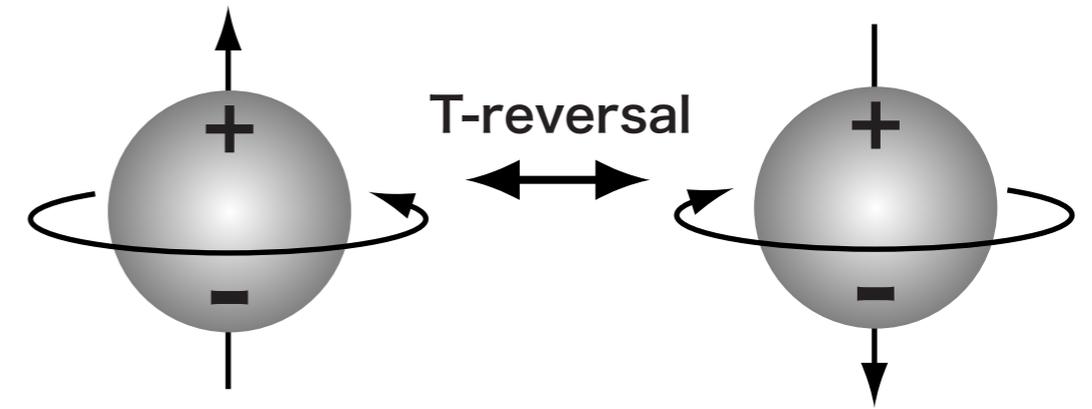
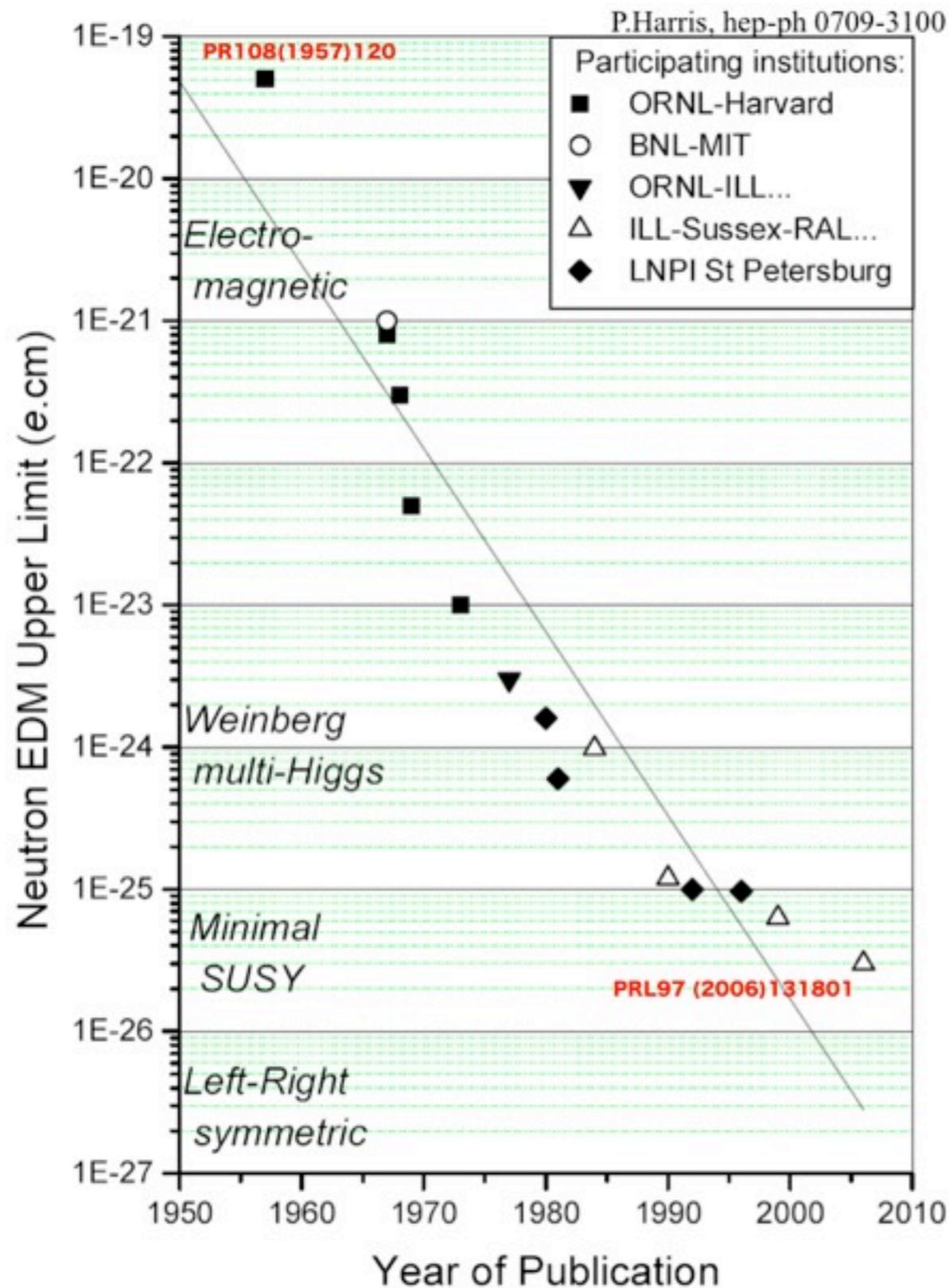


SUSY

$10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$



中性子電気双極子モーメント



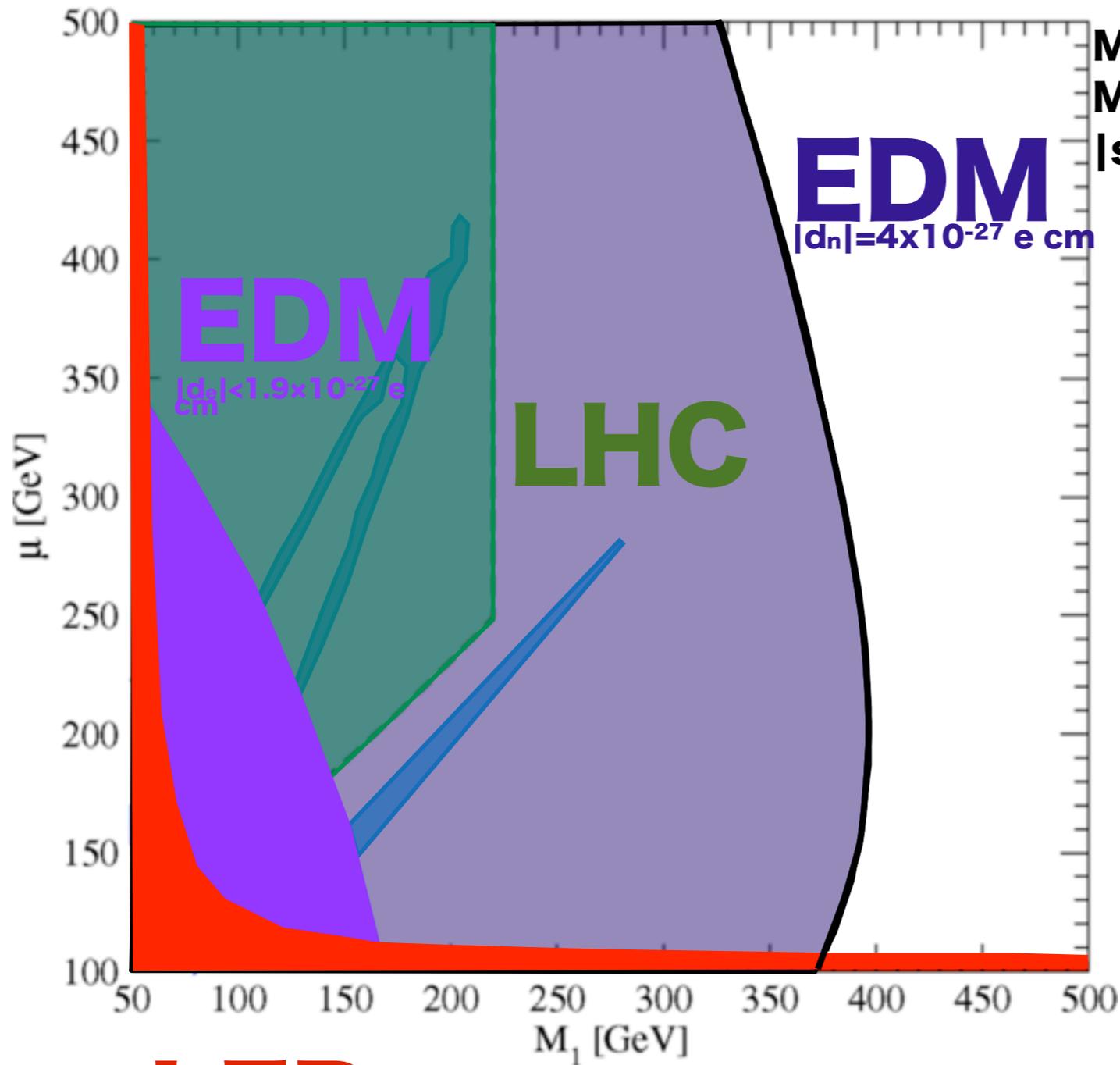
標準模型では $10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$ と観測できないほど小さいが、例えば **SUSY** を仮定すると $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ に値を取りうる

現在の上限値は
 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ と
あと一歩！

(Baker et al., PRL97 (2006) 131801)

中性子電気双極子モーメント

Ramsey-Musolf, Nucl.Phys.A805(2008)137c



$M_2 = 2M_1$
 $M_A = 1 \text{ TeV}$
 $|\sin \phi_\mu| = 0.5$

nEDMはSUSYに
感度が高い

現在の上限値は
 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ と

あと一歩！

LEP

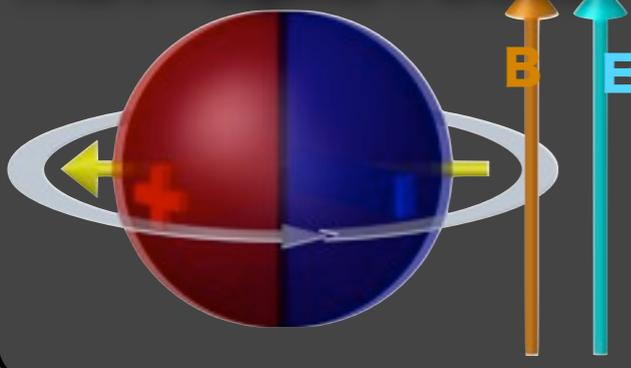
(Baker et al., PRL97 (2006) 131801)

中性子電気双極子モーメント

スピンをそろえた超冷中性子を容器に貯蔵し、電場と磁場を印可し
 スピン歳差回転を蓄積し、電場の向きによる回転数の変化を見る。

$$d_n = (+0.2 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})) \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

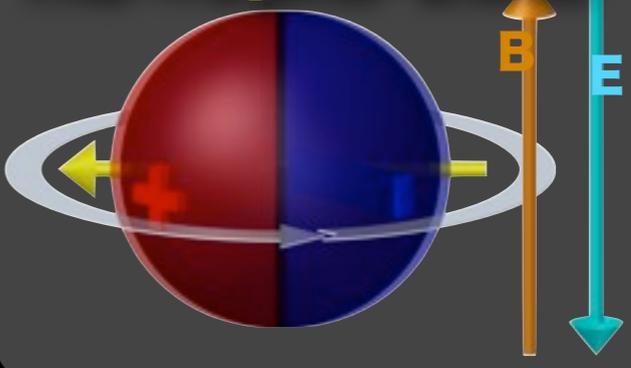
$\hbar\omega_+ = 2\mu_n B + 2d_n E$



$\Delta\phi = \int (\omega_+ - \omega_-) dt = \frac{2d_n E T}{\hbar}$

$B = 1 \mu\text{T}$
 $E = 10^4 \text{ V/cm}$
 $T = 100 \text{ s}$

$\hbar\omega_- = 2\mu_n B - 2d_n E$



$$\frac{\omega_{\pm}}{2\pi} = 3 \times 10^1 \frac{B}{1 \mu\text{T}} \pm 5 \times 10^{-8} \frac{d_n}{10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}} \frac{E}{10 \text{ kV/cm}}$$

magnetic

30 Hz

1 μT

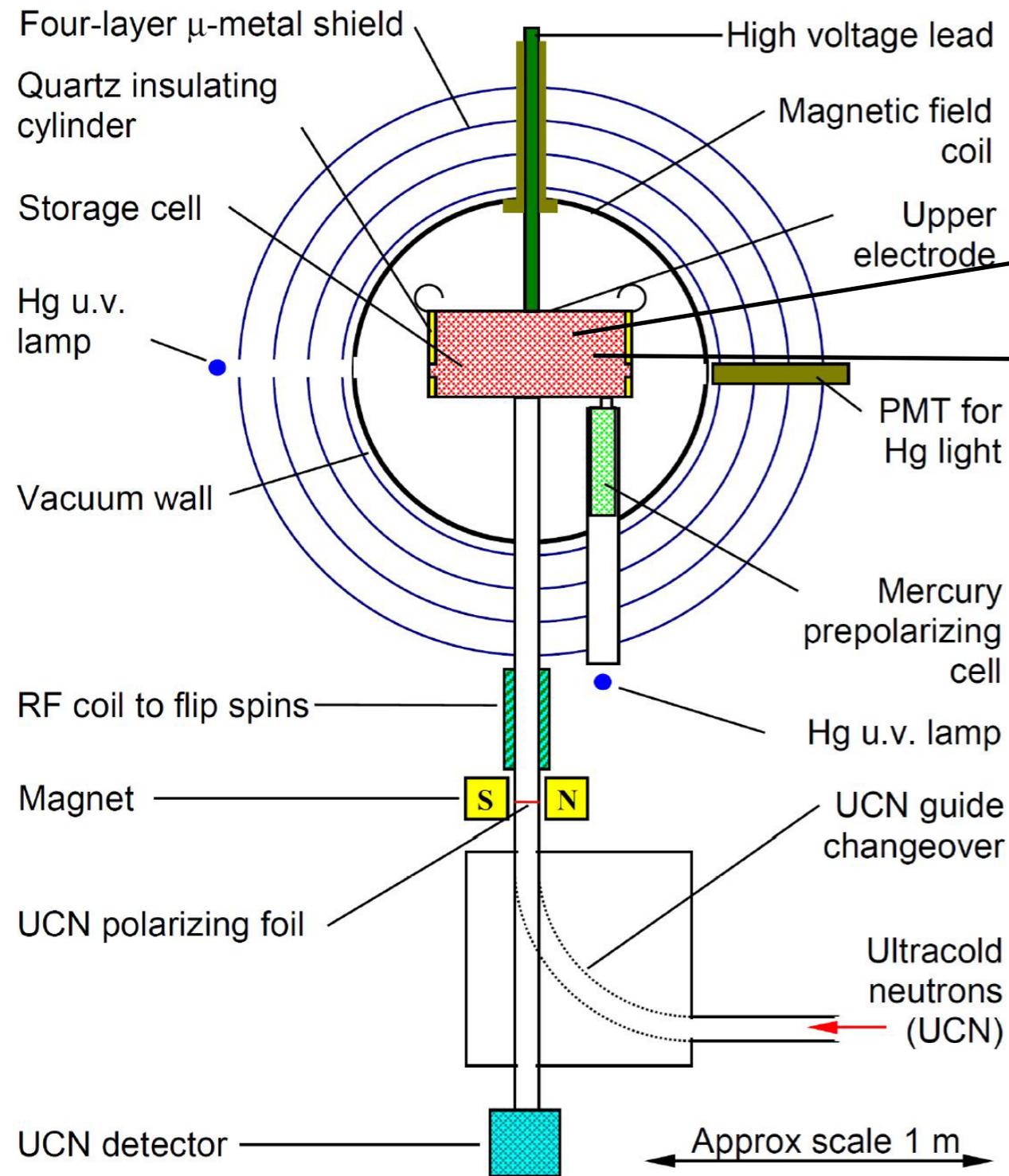
electric

50 nHz

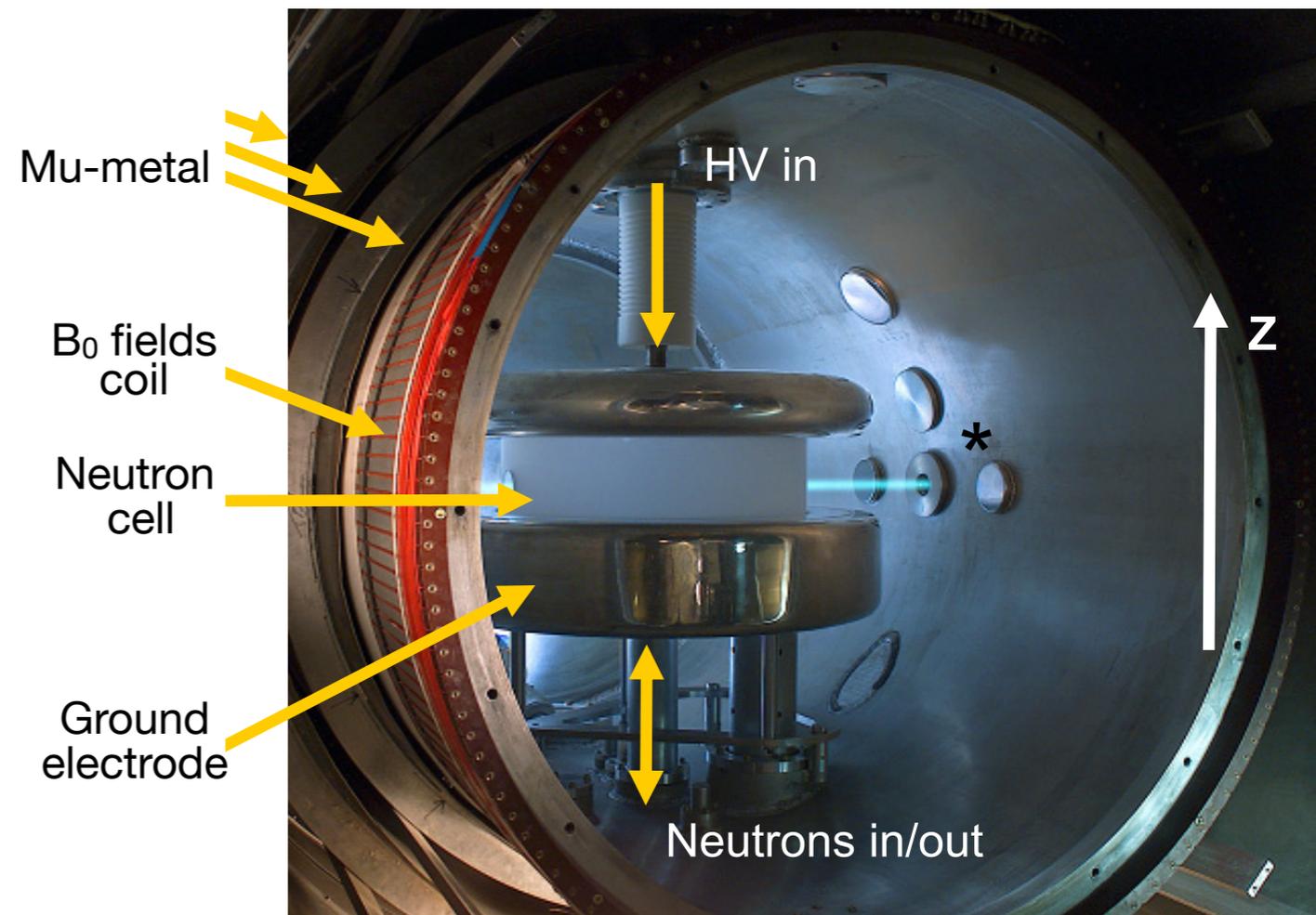
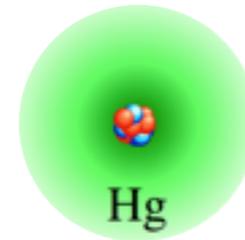
1 fT equiv.

中性子電気双極子モーメント

ILL実験



内部の磁場を測定するために Hg ガスを入れている



高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

中性子電気双極子モーメント

これまでの測定の上限

$< 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$

系統誤差の大きな原因

← 電場磁場の精度
(測定精度)

	Effect	Shift	σ at ILL	σ at PSI	σ at J-PARC (storage volume 1000 cm ³)
a	Door cavity dipole	-5.6	2.0	0.10	0.036
b	Other dipole fields	0.0	6.0	0.40	0.144
c	Quadrupole difference	-1.3	2.0	0.60	0.216
d	Uncompensated B drift	0.0	2.4	0.90	0.324
e	Leakage currents	0.0	0.1	0.10	0.036
f	$v \times E$ (translational)	0.0	0.03	0.03	0.03
g	$v \times E$ (rotational)	0.0	1.00	0.10	0.10
h	Second-order $v \times E$	0.0	0.02	0.02	0.02
i	ν_{Hg} light shift (geo phase)	3.5	0.8	0.40	0.20
j	ν_{Hg} light shift (direct)	0.0	0.2	0.20	0.072
k	Hg atom EDM	-0.4	0.3	0.06	0.06
l	Electric forces	0.0	0.4	0.40	0.14
m	ac fields	0.0	0.01	0.01	0.01
	Total	-3.8	7.2	1.31	0.67

Table 1: Summary of systematic errors ($10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$).

磁場測定のための磁束計が UCN 蓄積領域に入れられない (近づけてない)

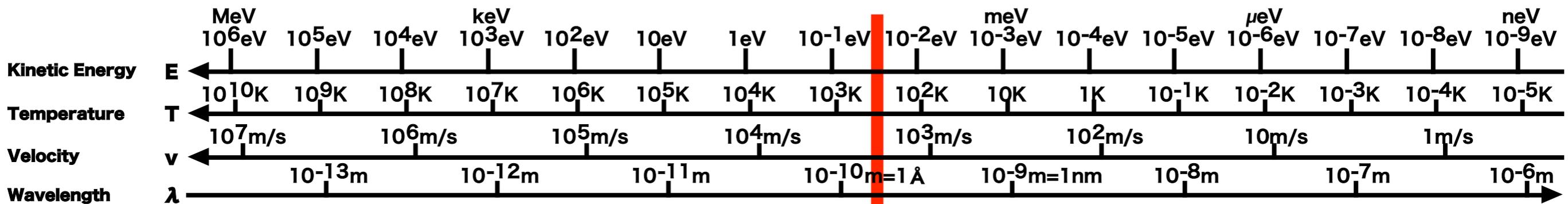
UCN 蓄積領域をなるべく小さくして、なるべく近くで測定する

幾何的な効果を小さくする

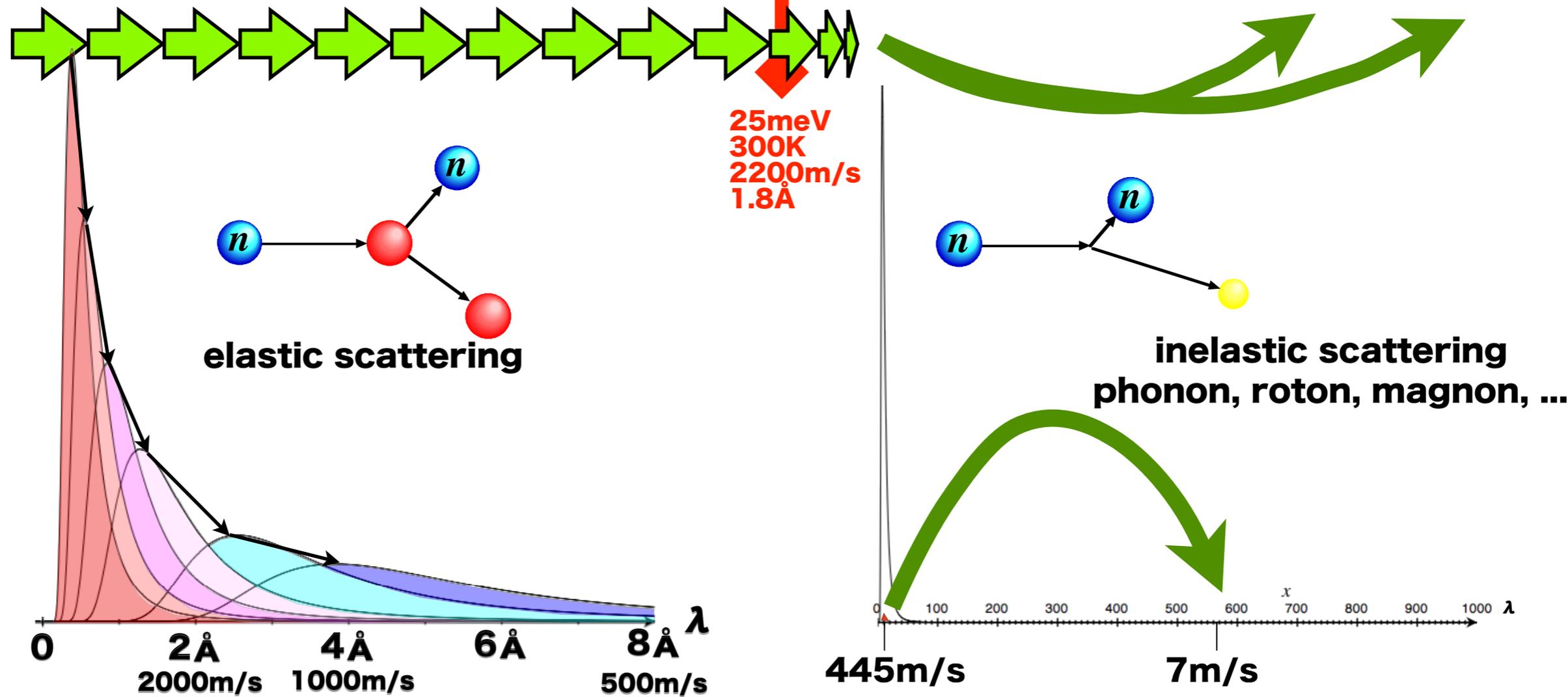
統計をあげるためには、**UCN の密度**を向上する必要がある

J-PARC に高密度UCN源を

超冷中性子



Fast Epithermal Thermal Cold Very Cold Ultracold



超冷中性子源

	ILL	PSI	SNS	TRIUMF	J-PARC
ρ_{ph} [cm ⁻³ (m/s) ⁻³]	0.004	0.7	0(1)	19	1.2 (→≤86)
E [kV/cm]	13	13	50	[>13]	[13]
T _i [s]	130	130	500	[>130]	[130]
共磁束計	Hg	Hg	³ He	Xe	Hg
一次ビーム	[原子炉]	DC	[冷中性子導入]	DC	Pulse
最大瞬間強度	-	1.3MW	-	0.2MW	20MW
利用する 平均強度	-	13kW	-	5kW	2kW
超冷中性子輸送	導管	導管	輸送無し [生成領域で計測]	導管	時間収束 (→位相空間重ね合わせ)
到達感度 [e cm/E _c =90neV]	2.9×10 ⁻²⁶	5×10 ⁻²⁷ →5×10 ⁻²⁸	0(10 ⁻²⁸)	0(10 ⁻²⁸)	1×10 ⁻²⁷ (→2×10 ⁻²⁸)
物理測定開始	-	2012→2014	2015?	2014-5	2014(→2018?)

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング

『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』

2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

超冷中性子源

C.-Y.Liu, Dissertation, Princeton Univ. (2002)

converter	He-II	Solid ortho-D₂	α-O₂
interaction	phonon	phonon	magnon?
converter temperature	0.7K	5K	2K
optimal neutron temperature	9K	29K	12K
production rate (30K neutrons)	$90 \times 10^{-11} \Phi_0 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	$1300 \times 10^{-11} \Phi_0 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	$\sim 1000 \times 10^{-11} \Phi_0 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
ideal lifetime (no wall loss, no upscattering)	886 s	146 ms	489 ms

low loss

large production rate

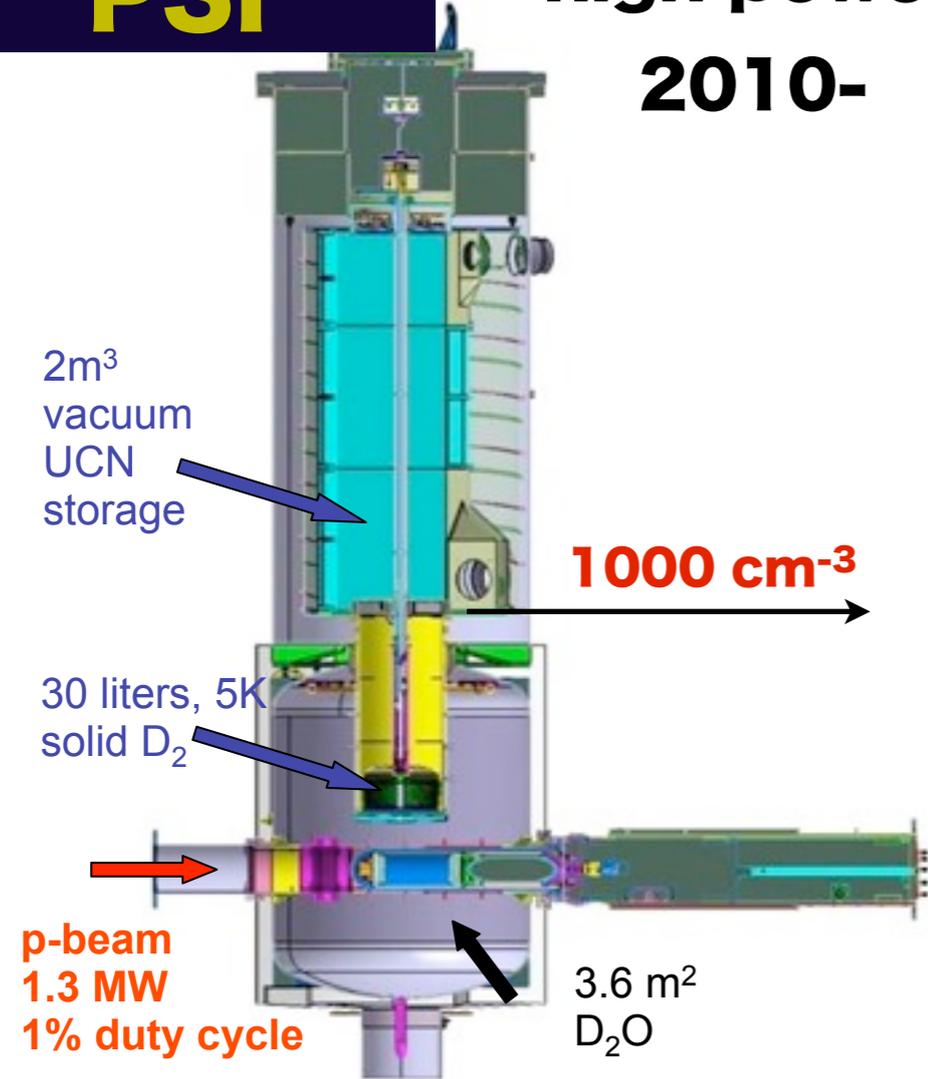
$$\rho_{UCN} = 10^{-11} \Phi_0$$

(thermal moderator)

超冷中性子源

PSI

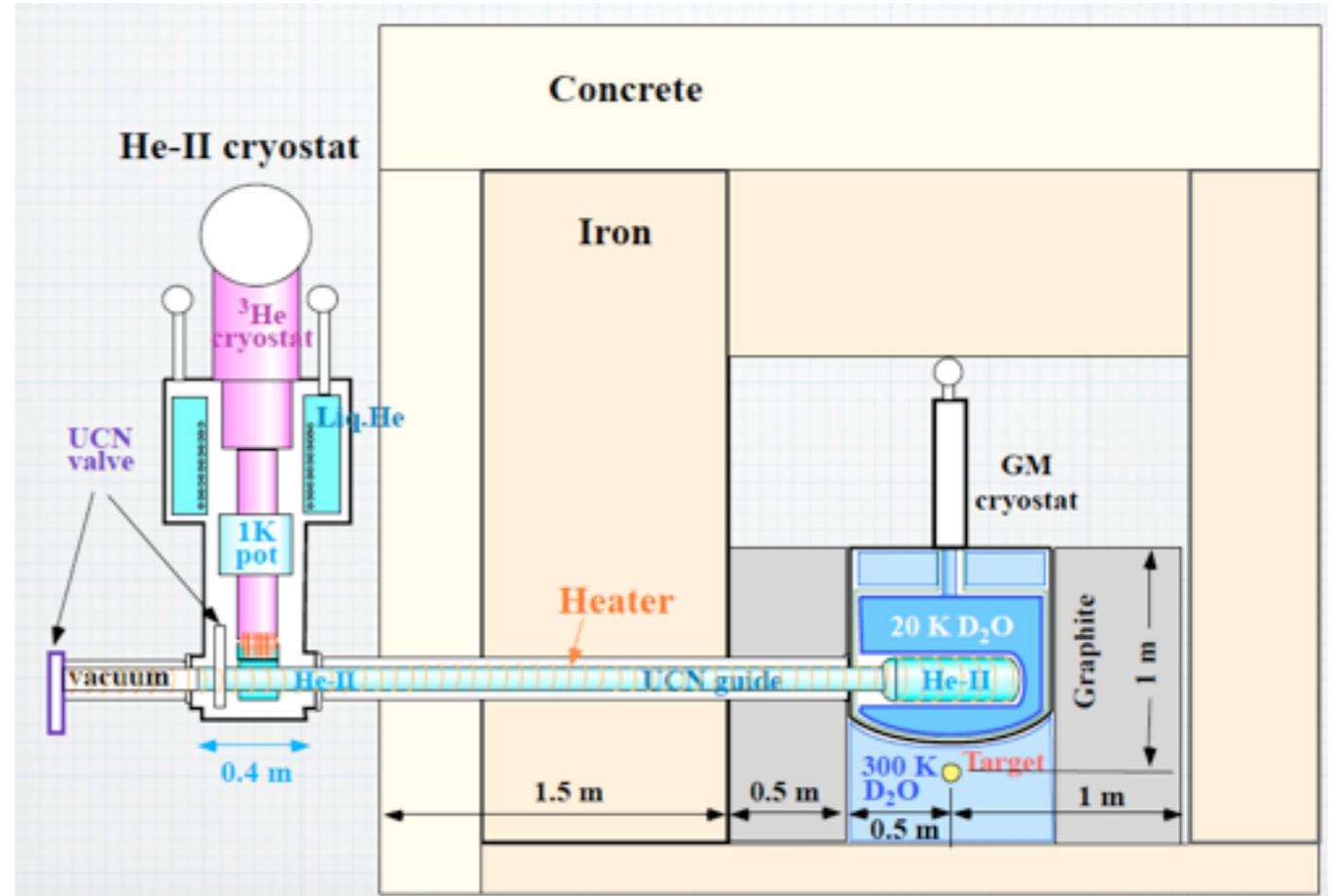
high power
2010-



average = 13kW
max. peak power = 1.3MW

TRIUMF

low loss
2013-?



average=20kW
max. peak power = 200kW

J-PARC

instantaneous power + transport optics

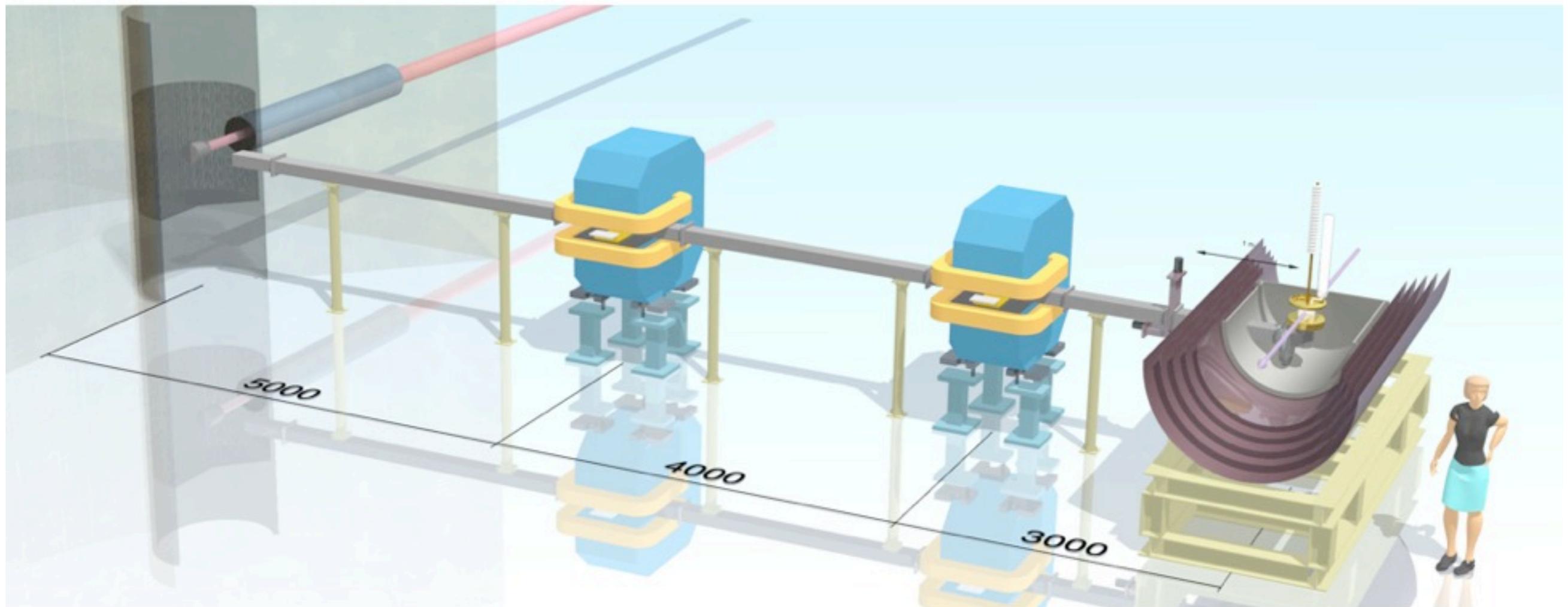
average = 2kW
max. peak power = 20MW

nEDM at J-PARC

J-PARC 線形加速器の陽子ビームを
専用ターゲットに直接入射、
超冷中性子に変換し
光学系を駆使して蓄積容器に高密度で
超冷中性子を**輸送**する

J-PARC UCN

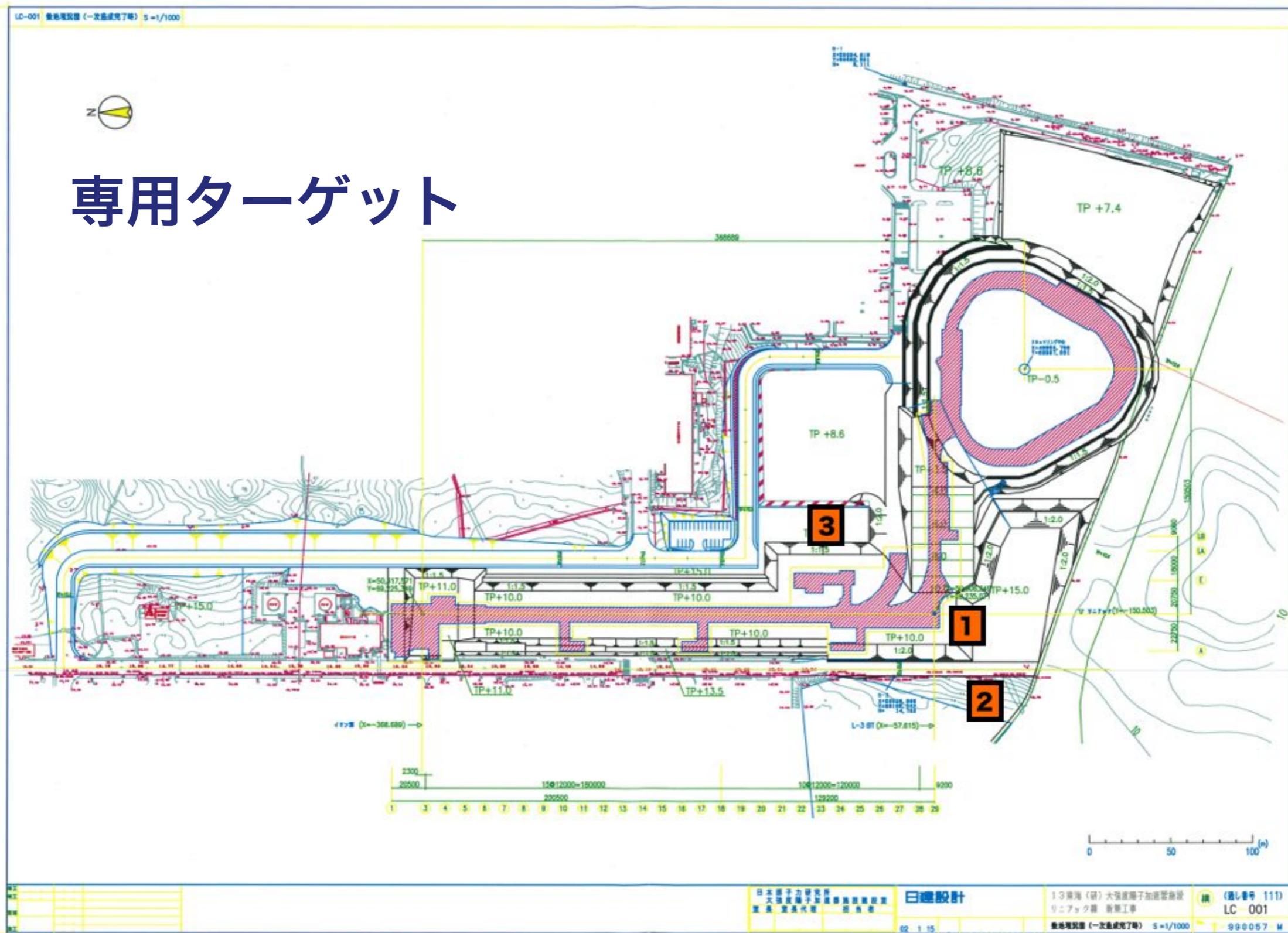
J-PARC PAC に
プロポーザルを提出(P33)



高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

nEDM at J-PARC

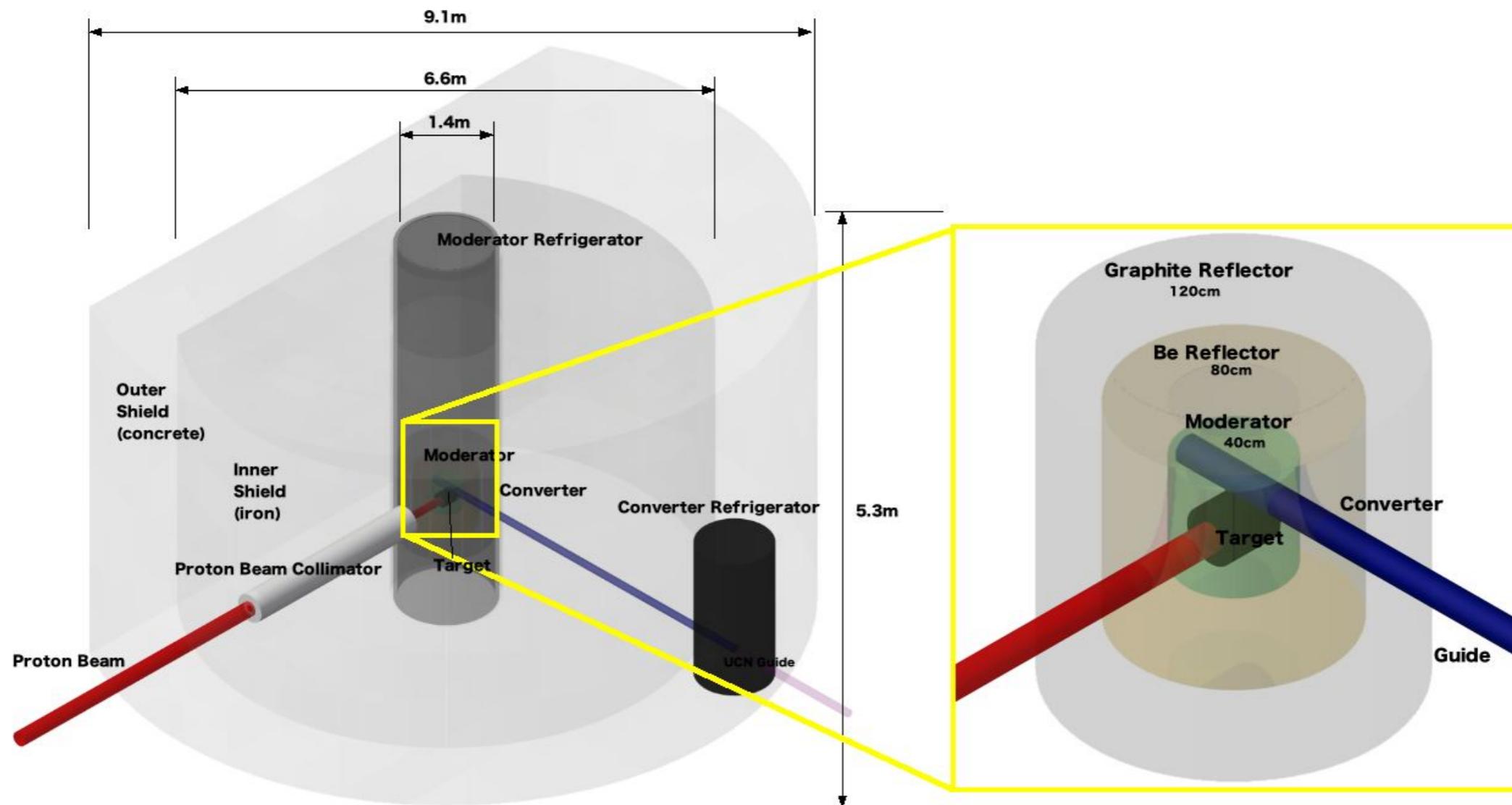
専用ターゲット



高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

nEDM at J-PARC

平均強度は弱いので、
遮蔽が少なくすむ、発熱も少ない



Specification of J-PARC Linac

Proton Energy	400MeV(at 2013?)
Pulse width	0.5 ms Moderation ~1.4ms
Repetition	25 Hz
Peak Proton Current	50 mA
Average Current	0.625 mA
Peak Power	20 MW
Average Power	250 kW

パルス性能をうまく使えないか？

nEDM at J-PARC

Production Rate

- Cold Neutron Flux

$$\Phi_{\text{boltzmann}} = 6.2 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{pulse}$$

- Production Rateを $1.0 \times 10^{-8} \Phi_{\text{boltzmann}}$ とすると

$$- \rho_{\text{UCN}} = 6200 \text{ UCN/cm}^3/\text{pulse} \text{ (Boltzmann)}$$

Heat load

- Heat load on D₂ cell is 3W/pulse.

It correspond to **152mK/pulse**

ちなみに20MWDCだと1秒で300Kの温度上昇。

nEDM at J-PARC

Neutron Rebuncher

パルス状に発生するが、輸送の間に広がってしまう



not different from continuous UCNs ...

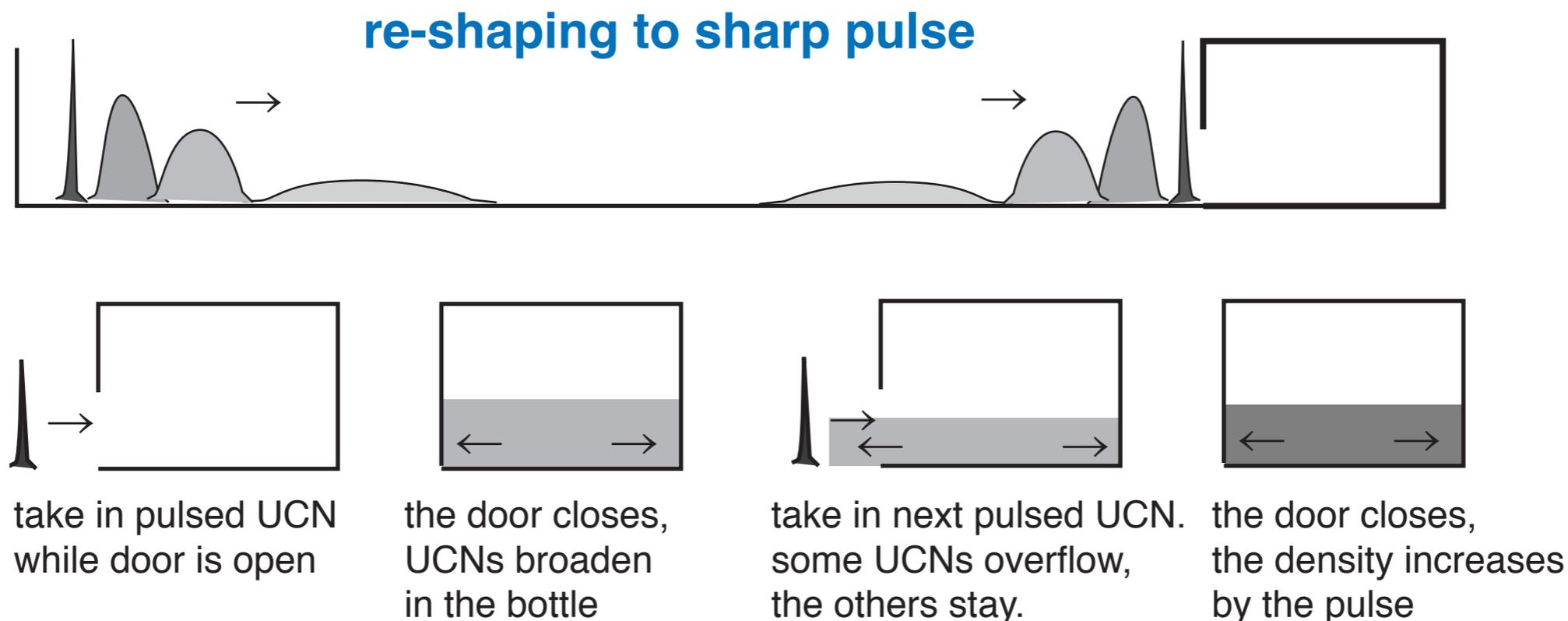
Peak proton power = **20MW**

Average proton power = **250kW**

nEDM at J-PARC

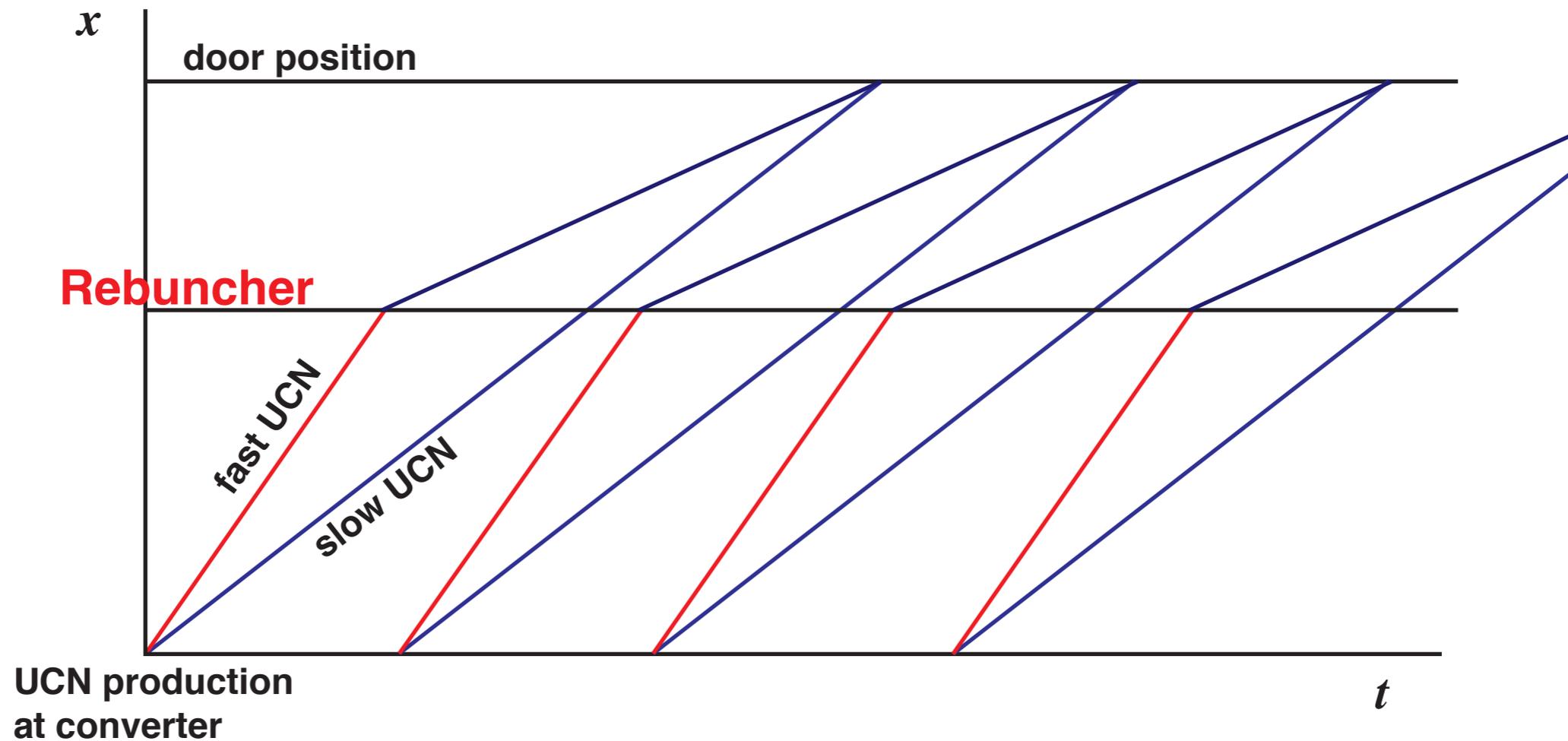
Neutron Rebuncher

パルス状に発生するが、輸送の間に広がってしまう
蓄積容器入り口で集束させる



nEDM at J-PARC

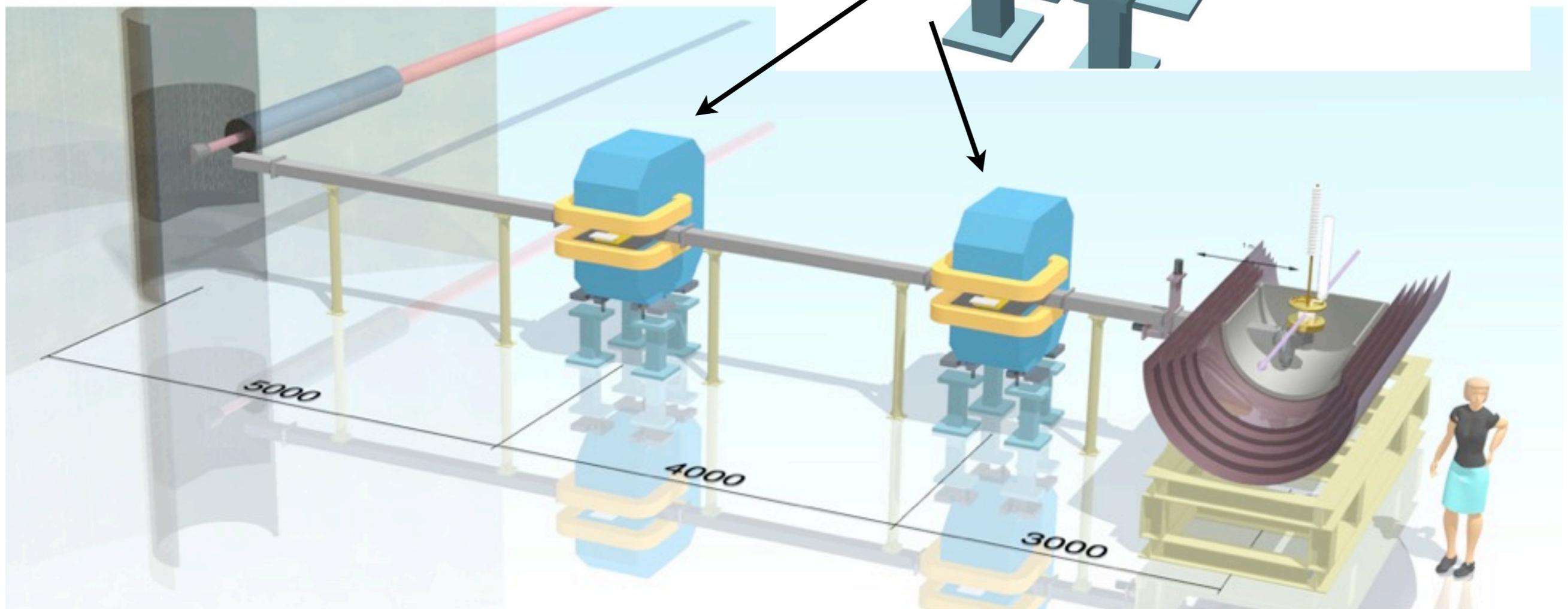
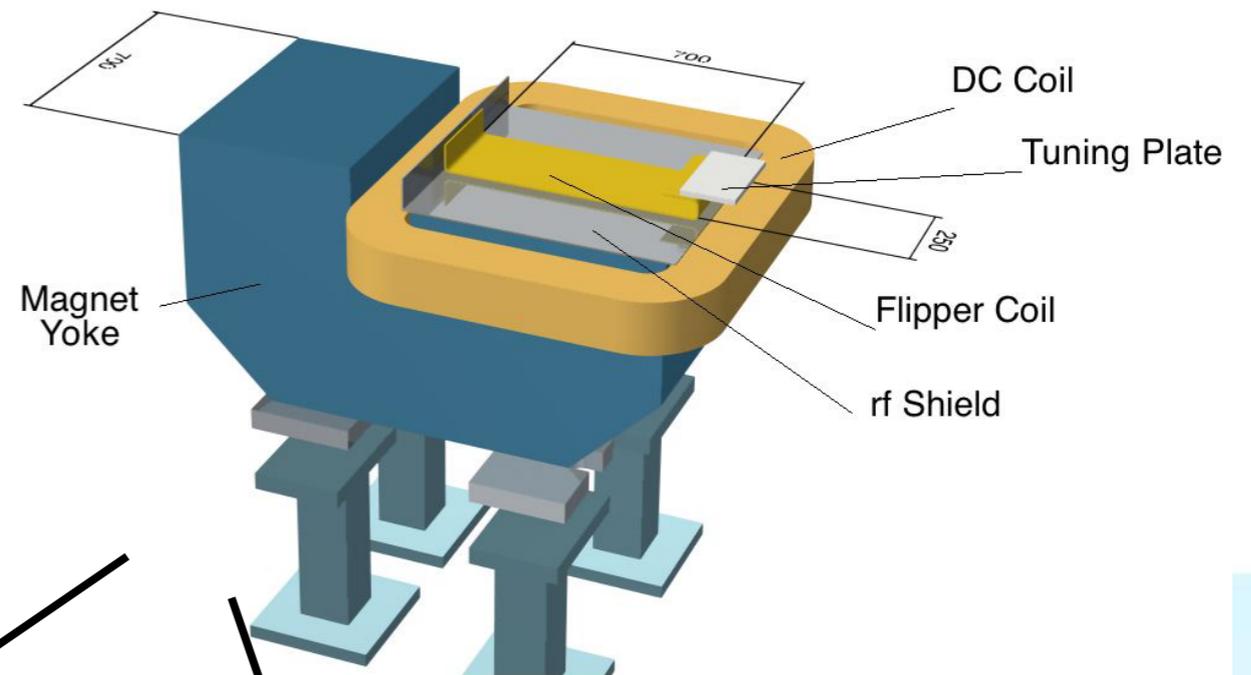
Neutron Rebuncher



nEDM at J-PARC

Neutron Rebuncher

静磁場と共鳴条件を満たすRF磁場を通過すると、スピンの反転し、エネルギーを交換する



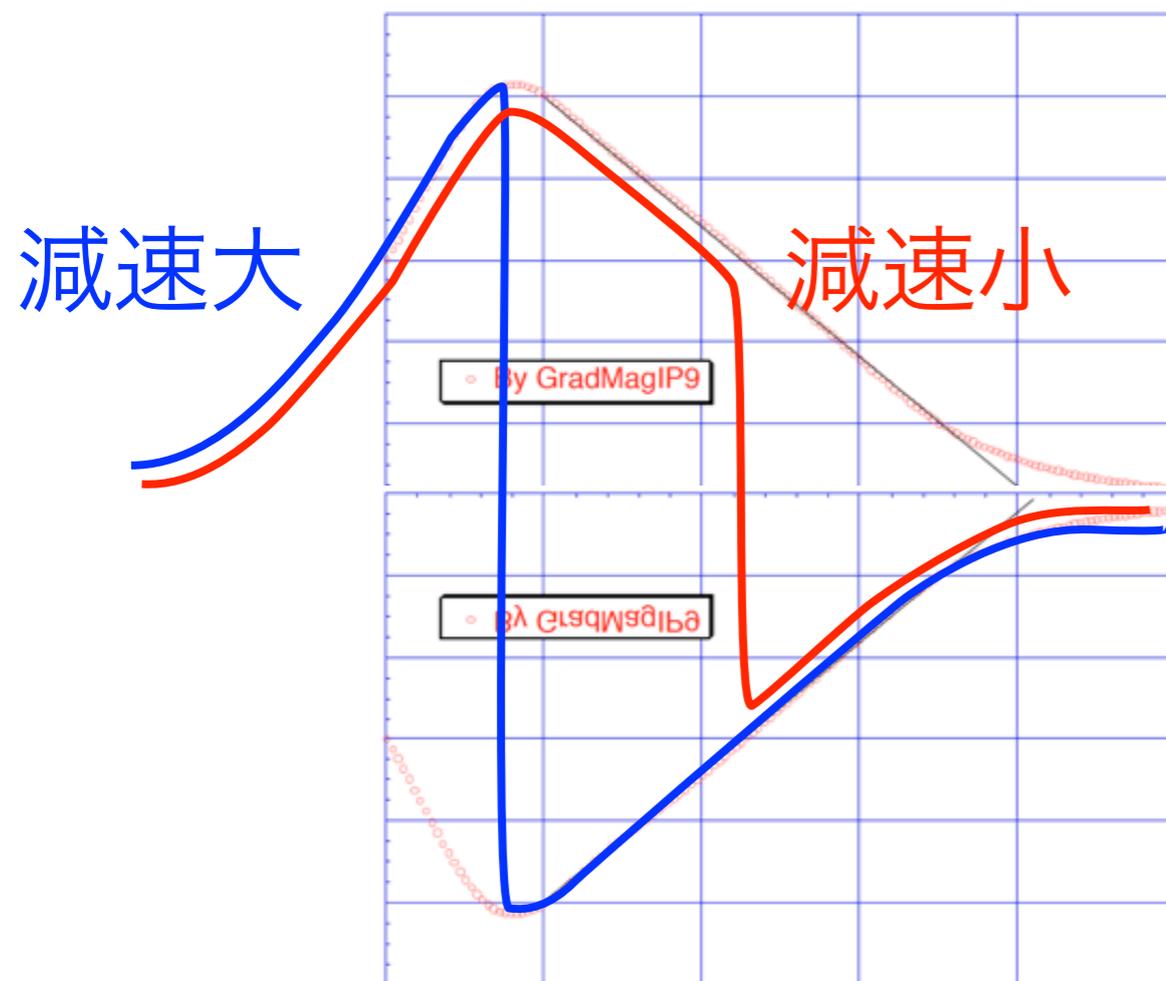
高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

nEDM at J-PARC

Neutron Rebuncher

静磁場と共鳴条件を満たすRF磁場を通過すると、スピンの反転し、エネルギーを交換する

交換されるエネルギーは周波数に比例



速い中性子は先にrebuncherに到達

減速量大 = 高周波

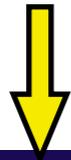
遅い中性子は遅れてrebuncherに到達

減速量小 = 低周波

時間に応じて
周波数を変化させる

nEDM at J-PARC

$\phi = 1.2 \text{ cm}^{-3} (\text{m/s})^{-3} (2\text{Hz})$



30% rebuncher design was finished in Jun. 2010

prototype rebuncher

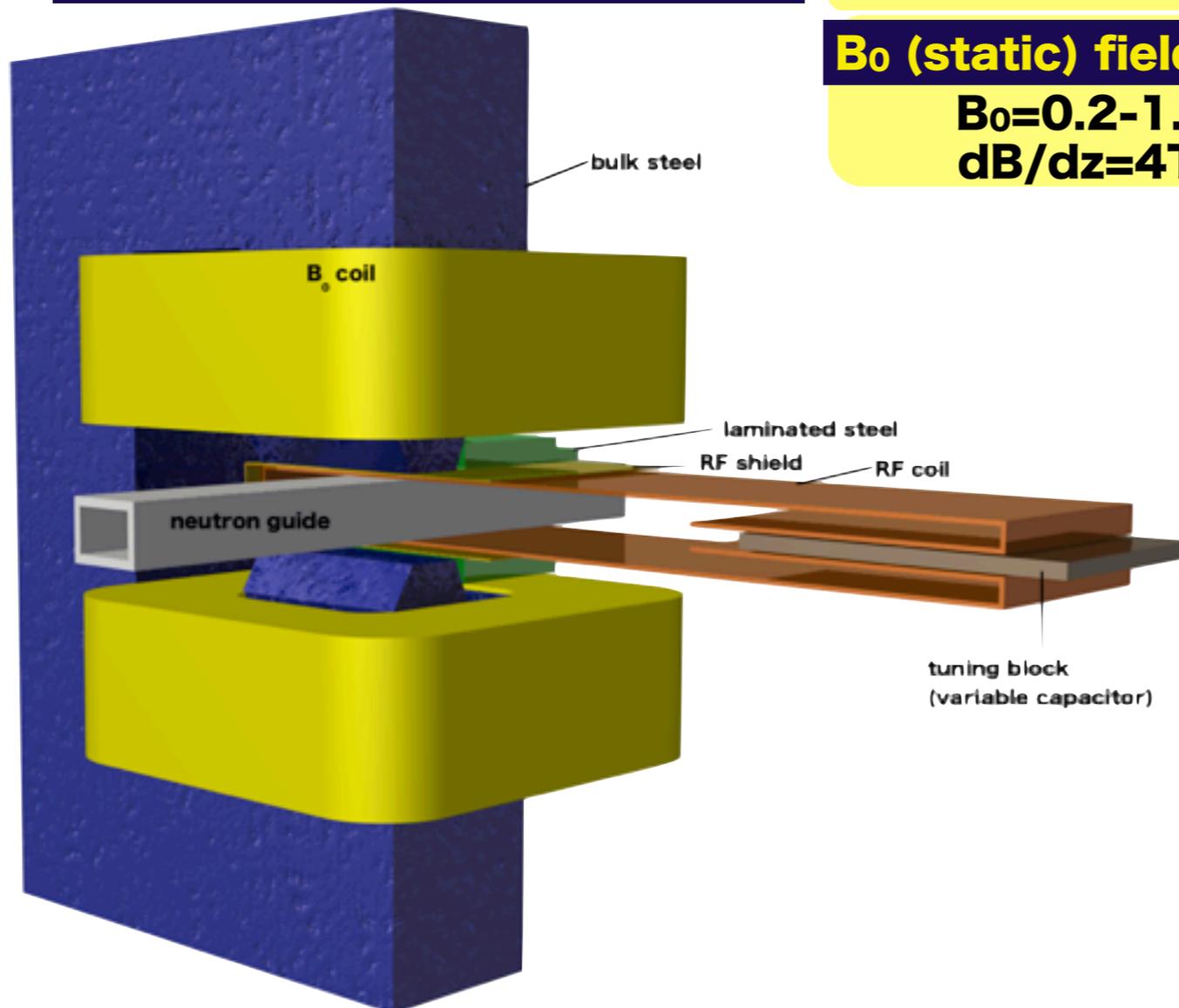
$4 < v < 7.2 \text{ m/s}$, $L_{\text{focus}} = 12\text{m}$ repetition = 2Hz

B_0 (static) field

$B_0 = 0.2 - 1.0\text{T}$ ($0 < z < 0.25\text{m}$)
 $dB/dz = 4\text{T/m}$

B_1 (RF) field

$\omega/2\pi = 6 - 30\text{MHz}$
 $B_1 = 1\text{mT}$



Adiabaticity

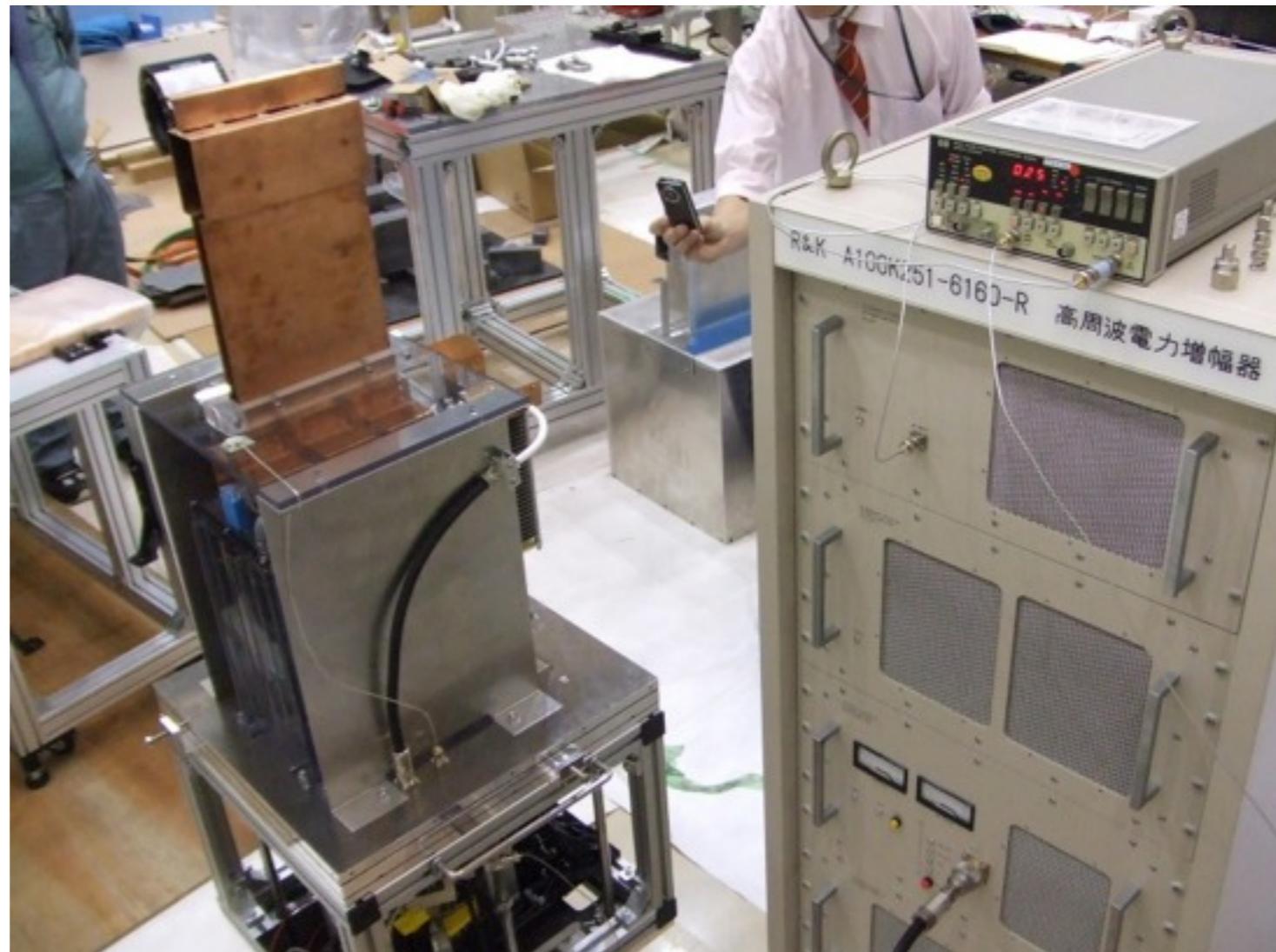
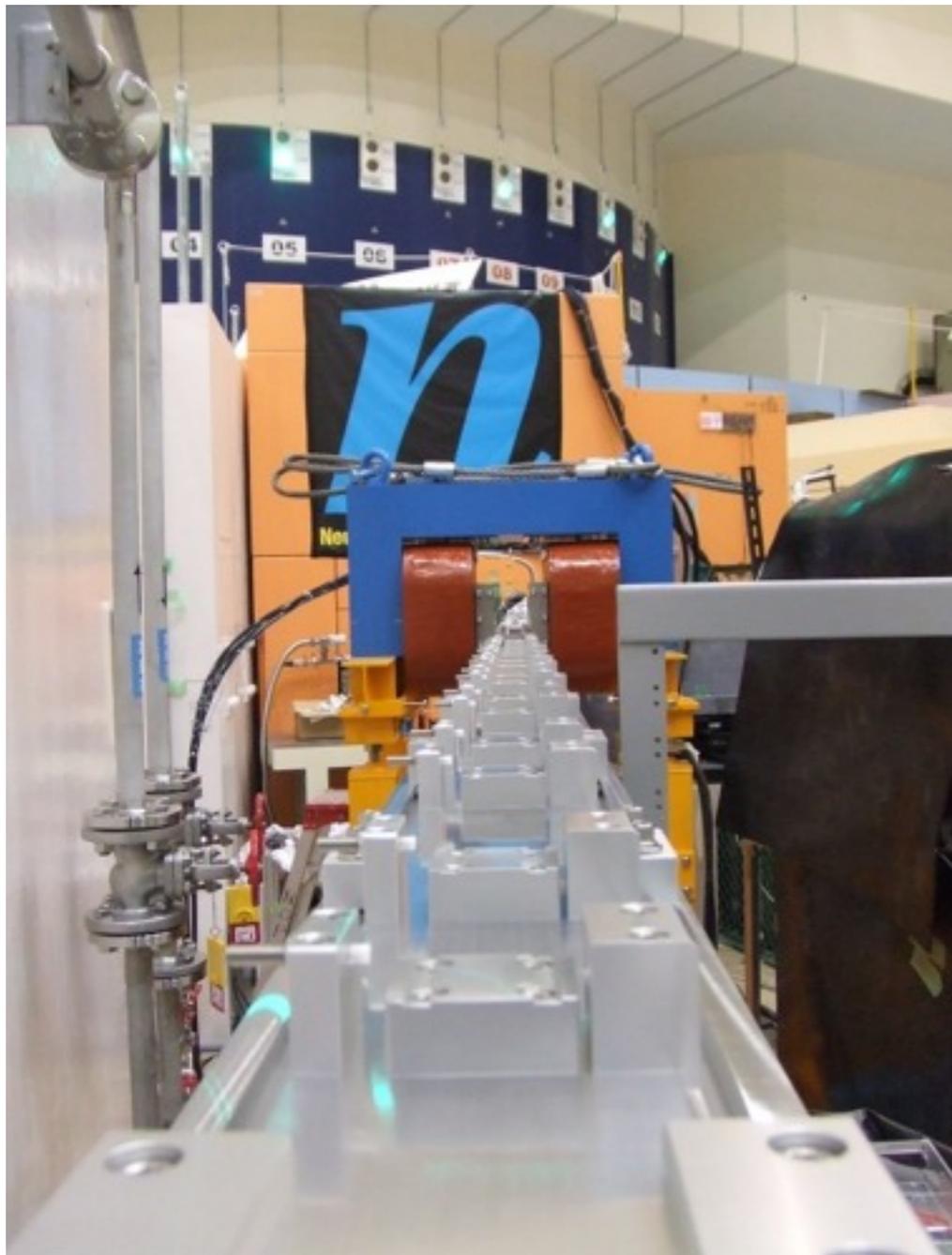
$$K^2 = \frac{\omega_{\text{Larmor}}}{\omega_B} = \frac{\gamma_n B_1^2}{v_n (\partial B / \partial z)} \geq 6.5 \quad (v_n \leq 7.2\text{m/s})$$

adiabatic condition is sufficiently fulfilled to deliver the spin flip efficiency of 0.99 (NIMA369(1996)195)

improved version is under study

nEDM at J-PARC

rebuncher 実証実験



実証機を製作 テスト実験を開始

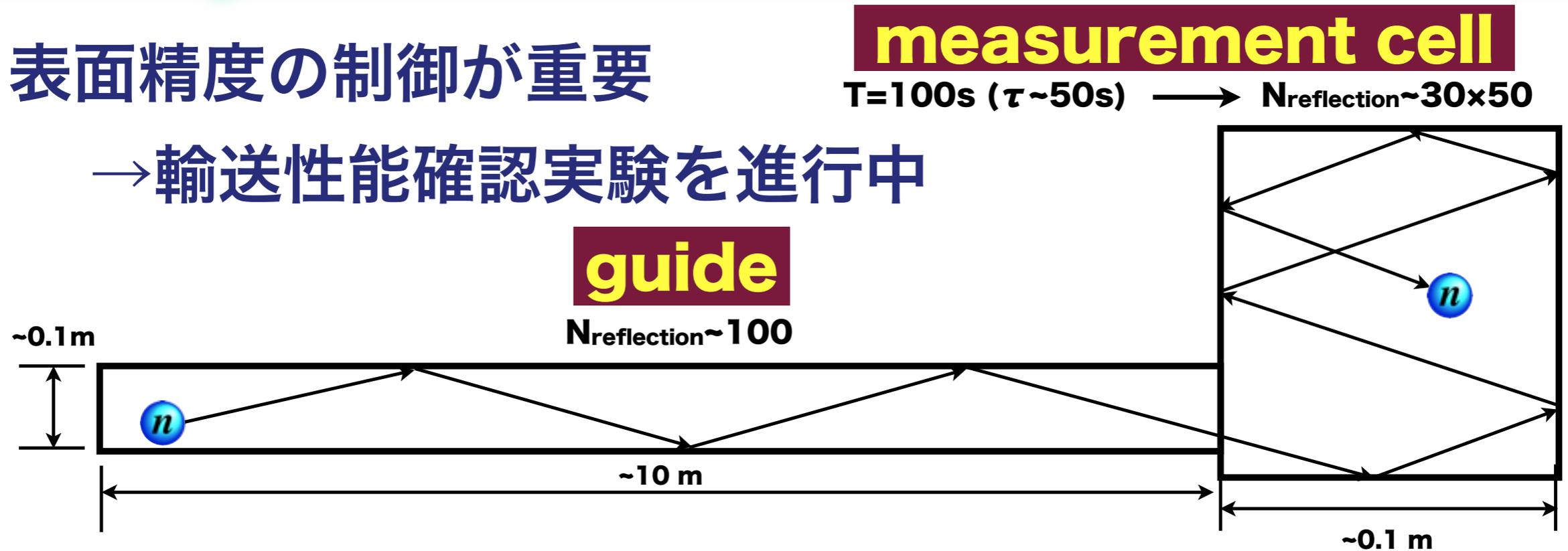
高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

輸送系、磁力計、測定計

中性子輸送

表面精度の制御が重要

→ 輸送性能確認実験を進行中



low reflection loss preferred

for larger transmission

$$1 - R < 10^{-3}$$

“specular” reflection preferred

for smoother transmission

$$R_{\text{non-specular}} < 10^{-3}$$

low reflection loss preferred

for longer storage time

$$1 - R < 10^{-3}$$

“non-specular” reflection preferred

for suppressing collective motion

$$R_{\text{non-specular}} \sim 10^{-1}$$

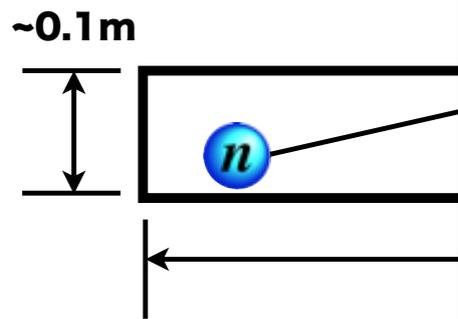
輸送系、磁力計、測定計

中性子輸送

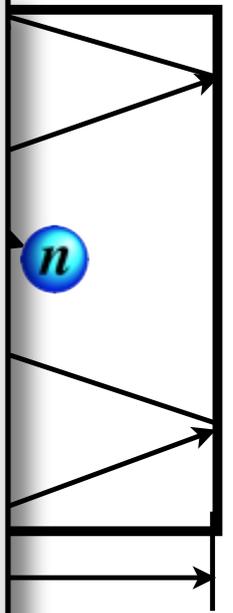
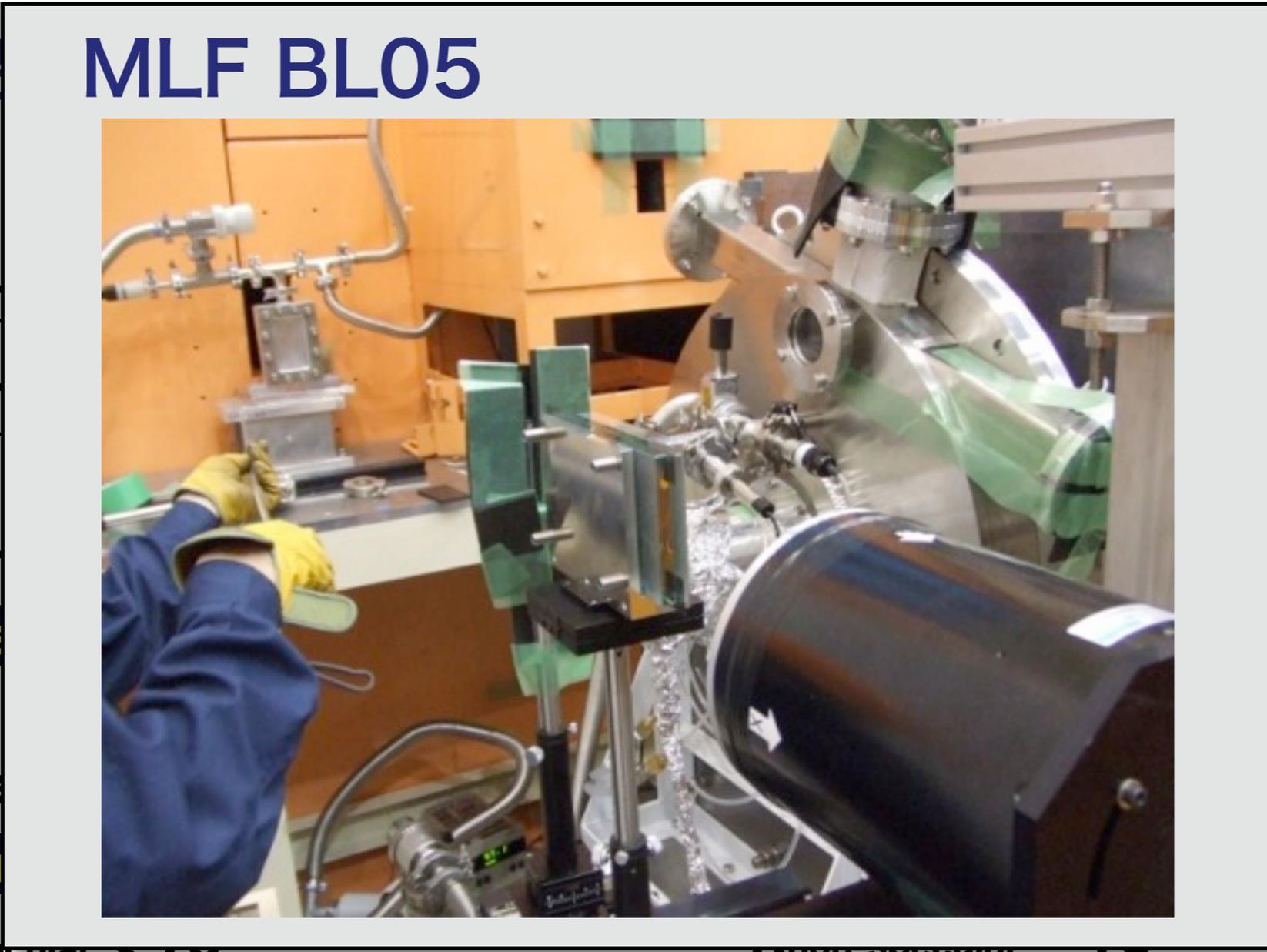
表面精度の制御が重要

measurement cell
T=100s ($\tau \sim 50s$) \longrightarrow Nreflection $\sim 30 \times 50$

→ 輸送性 MLF BL05



low reflection
for larger tra
 $1 - R <$
 “specular” re
for smoother



ed
 preferred
motion

Rnon-specular ~ 10

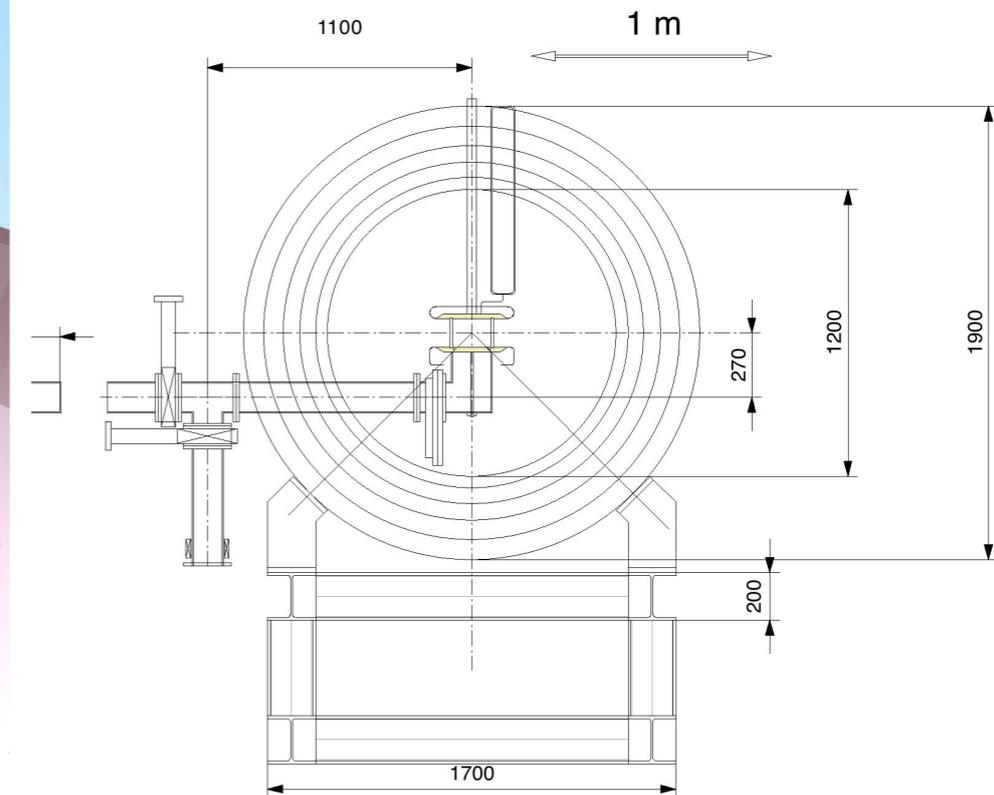
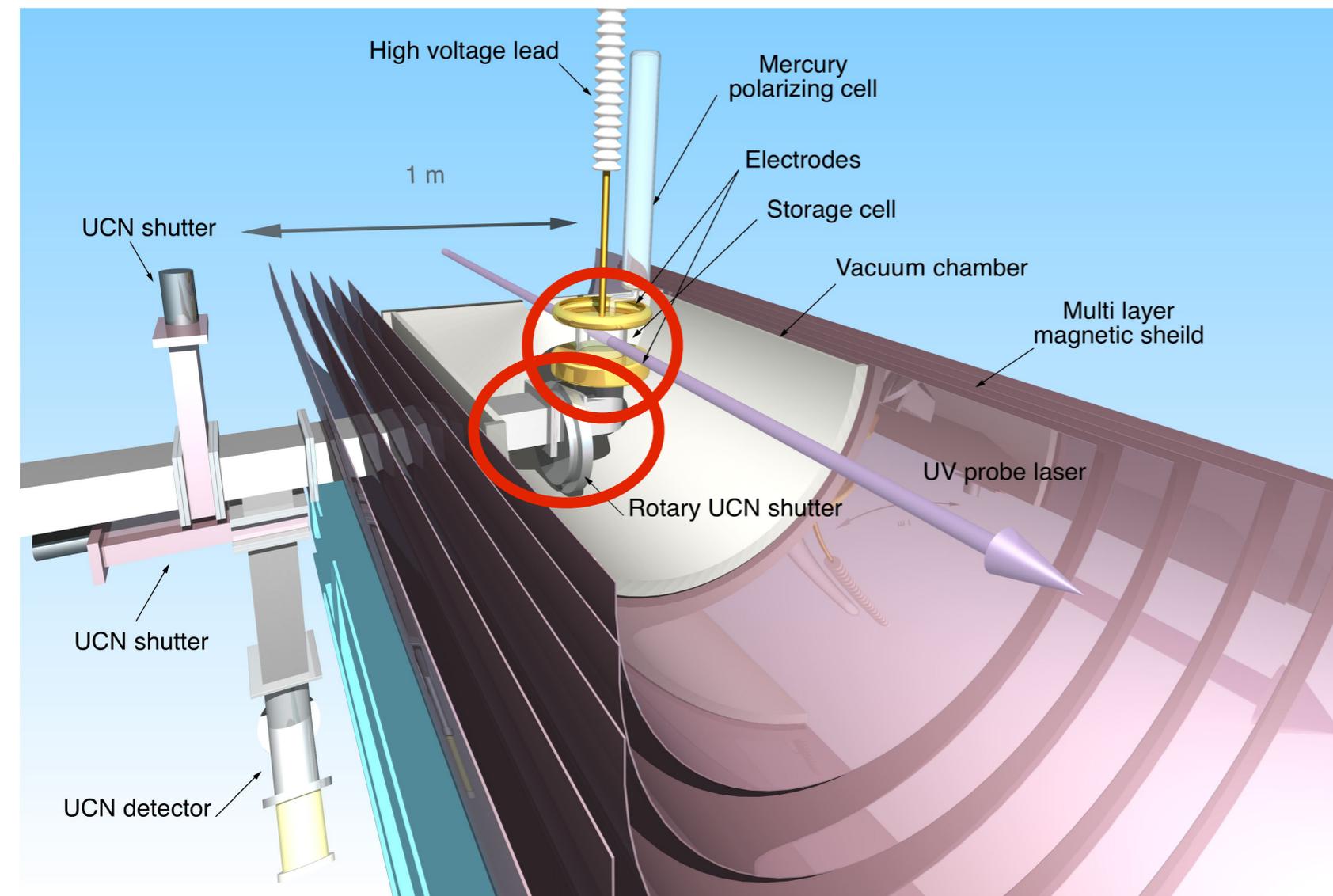
Rnon-specular ~ 10

輸送系、磁力計、測定計

測定セル

基本的には ILL と同じ

セル表面の研究や rebuncher のドアなどが開発項目

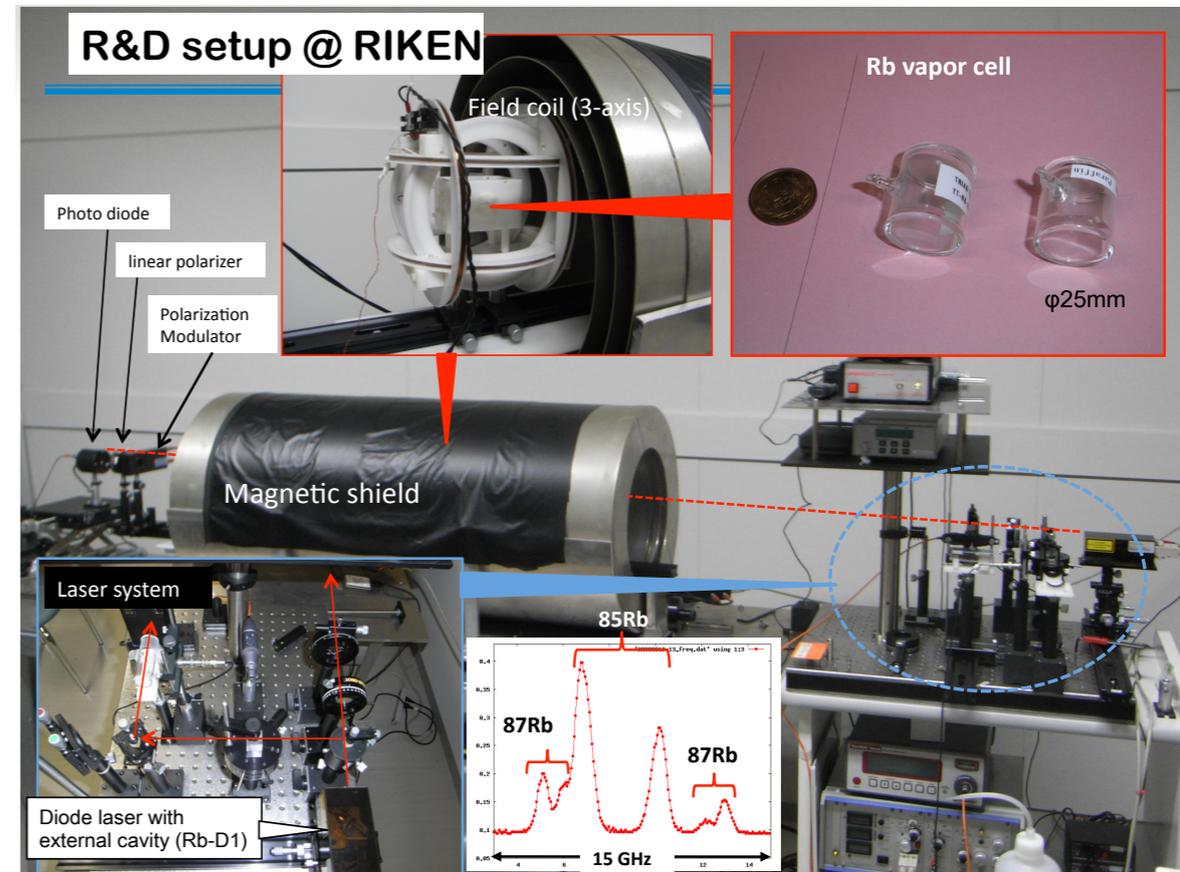


Magnetometry

Rb NMOR magnetometer

in progress for the atomic EDM research at T.I.T. and RIKEN as a Grant-in-Aid Program.

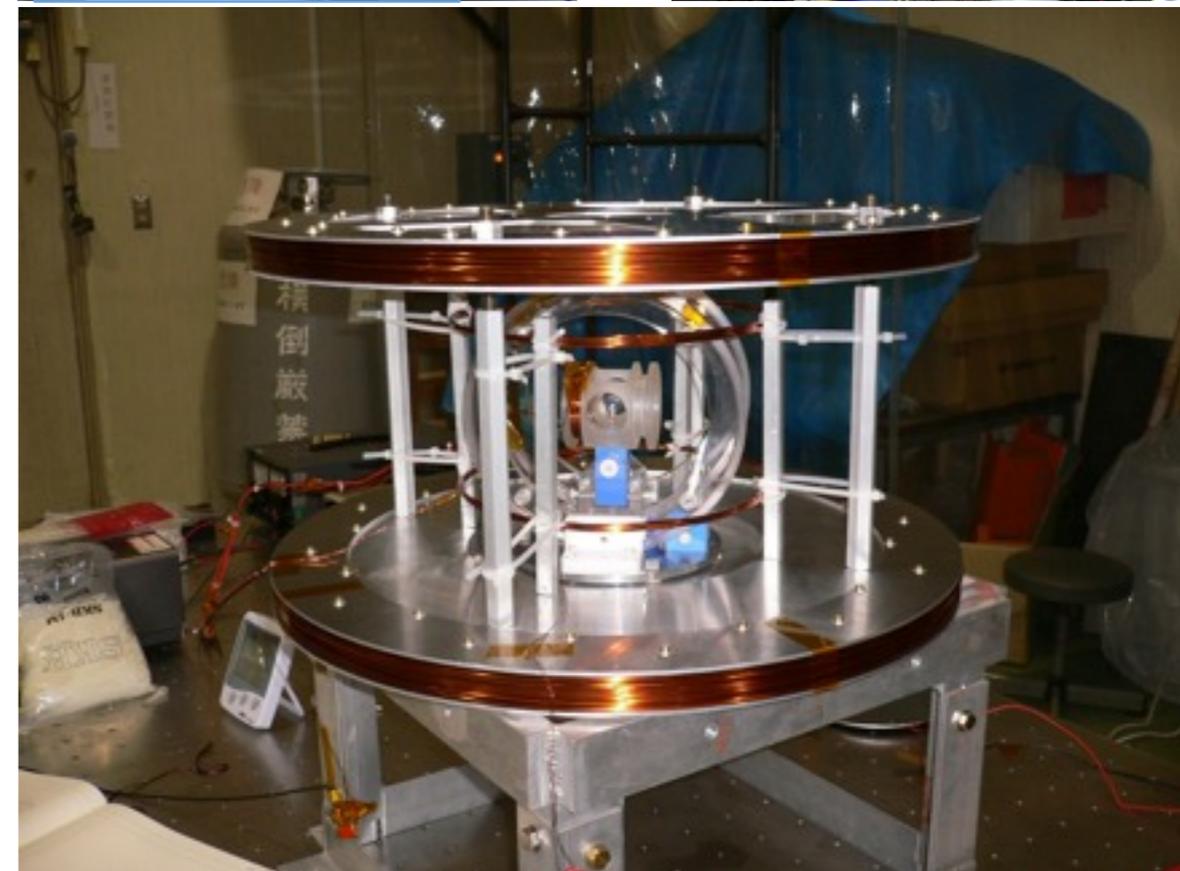
Goal sensitivity = 100 aT (=0.1 fT)



Hg Co-magnetometer

We start the study with a Hg lamp using the infrastructure of the ^3He nuclear polarization R&D station at the KEK/IMSS.

If funding is successful, we employ the UV laser in FY2011.



Magnetometry

Rb NMOR magnetometer

in progress for the atomic EDM research at T.I.T. and RIKEN as a Grant-in-Aid

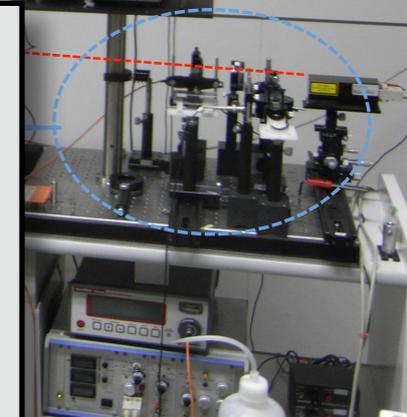
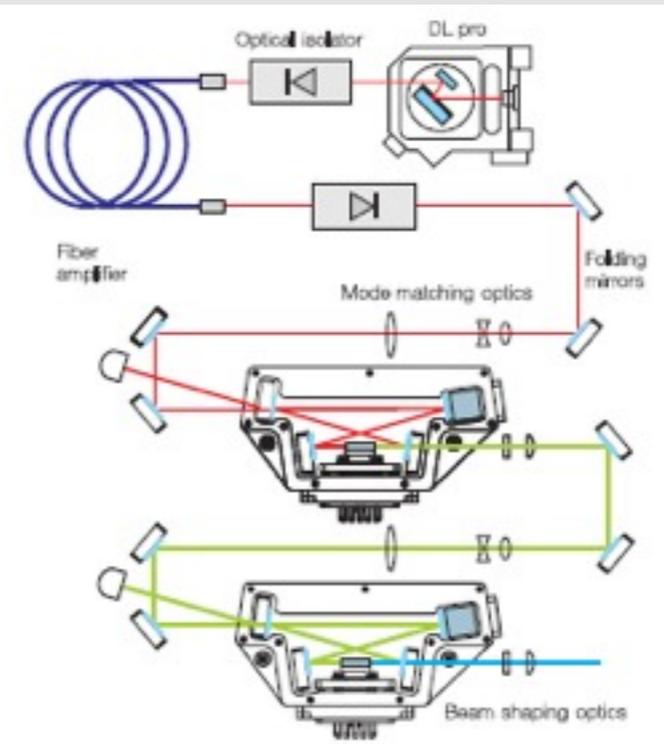
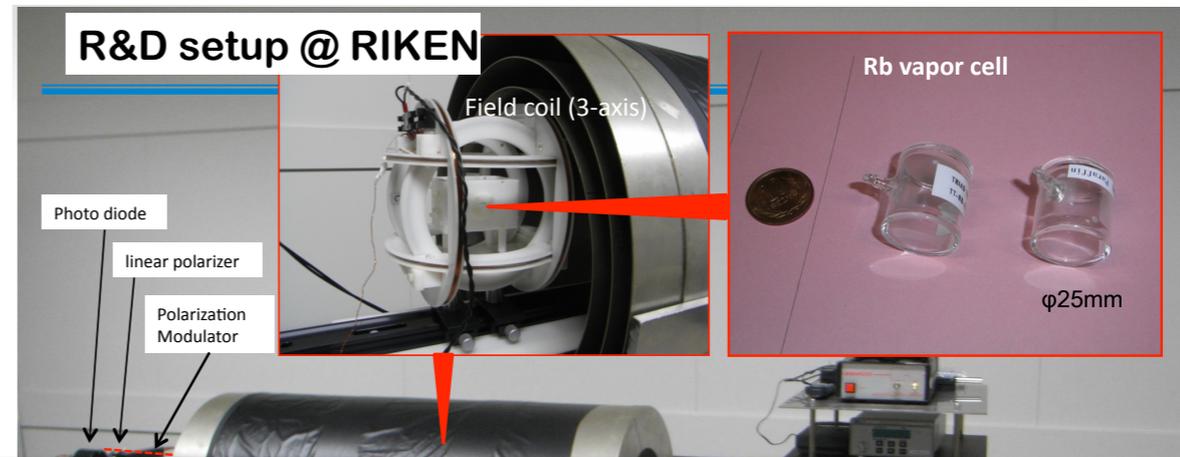
Goal sensitivity

Hg Co-magnetometer

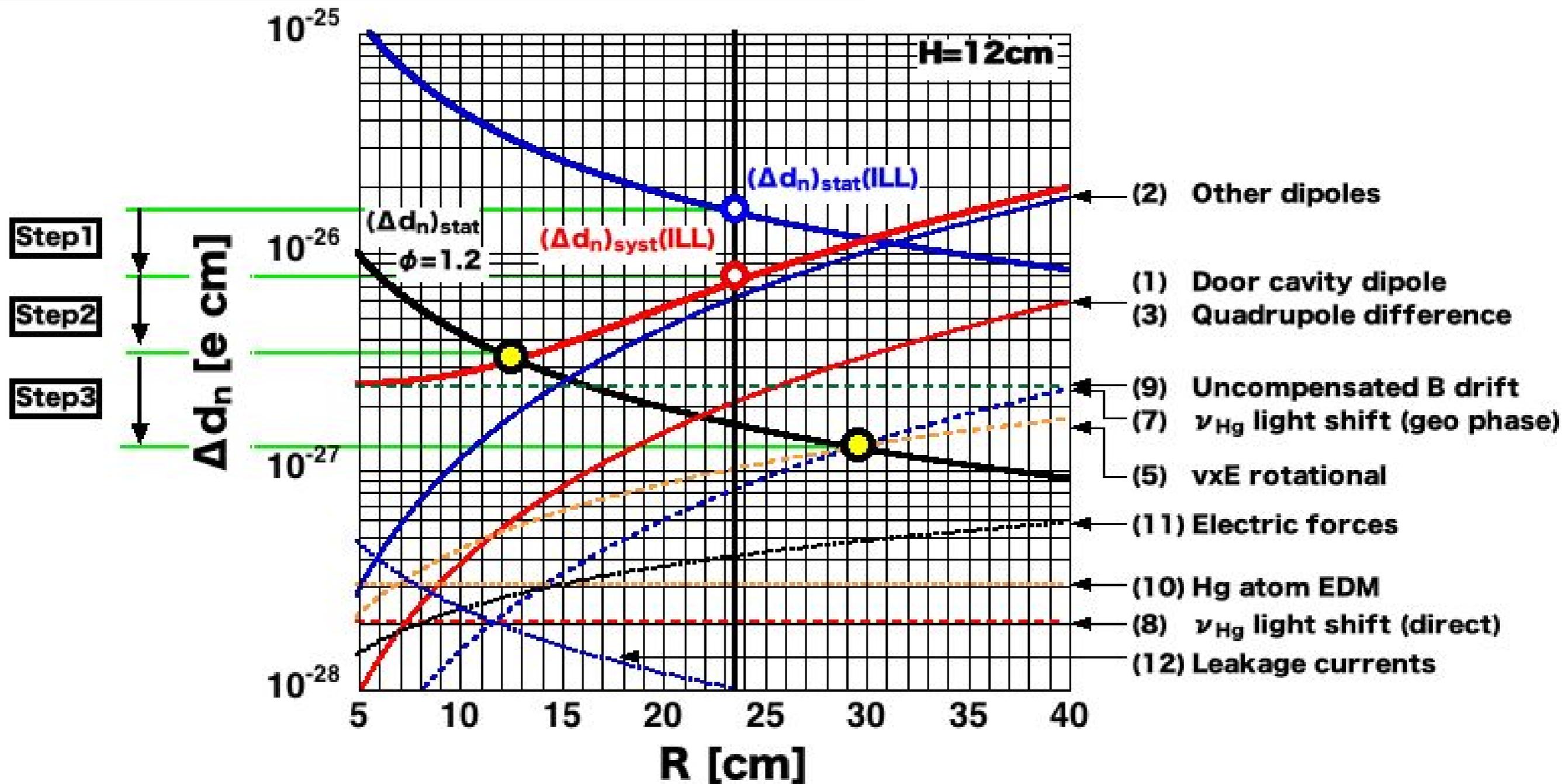
We start the study using the infrared nuclear polarization at the KEK/IMSS.

If funding is successful, the UV laser in

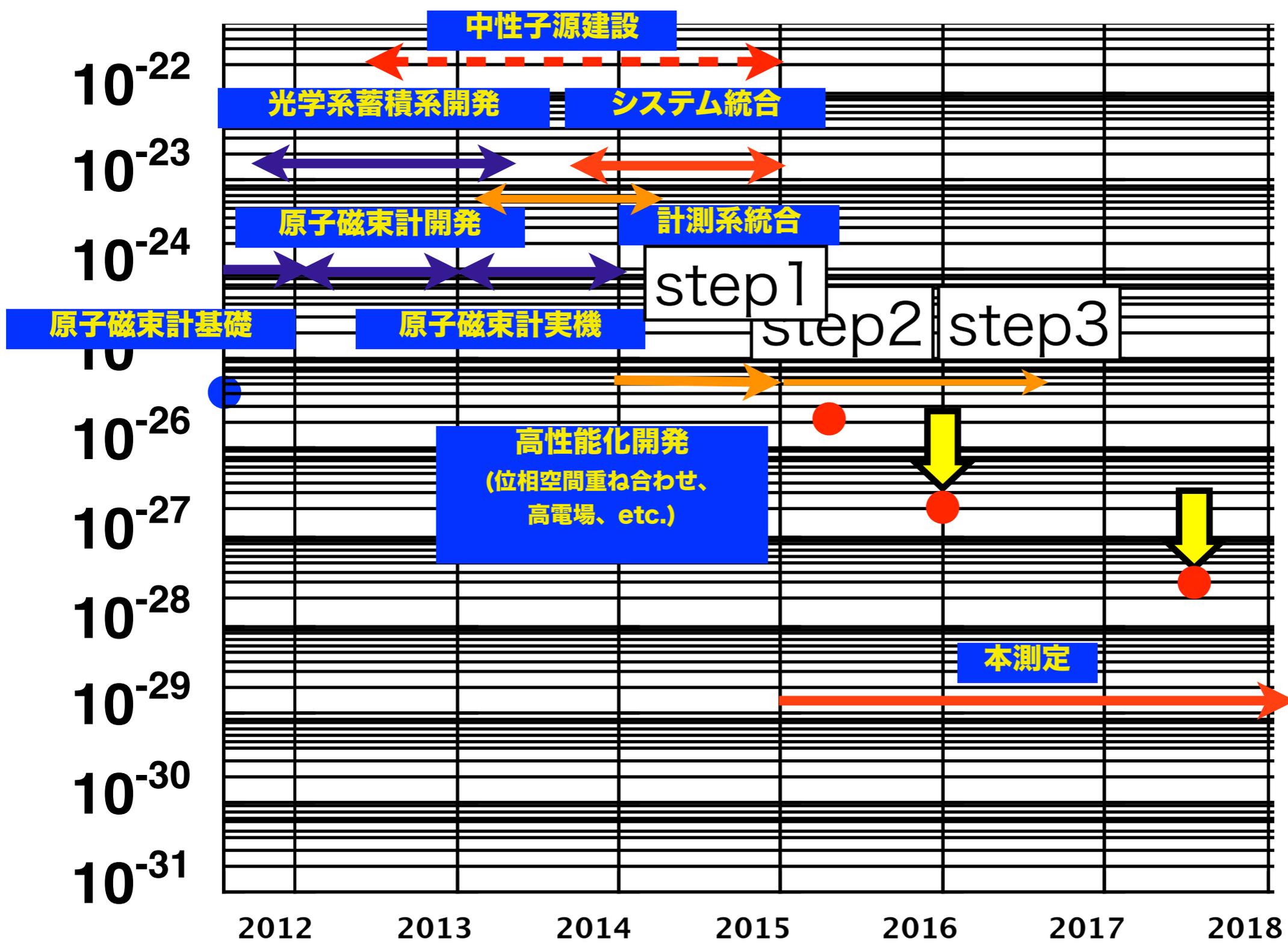
高精度磁束計のためのレーザー



nEDM at J-PARC 精度向上



nEDM at J-PARC 年表



技術開発が順調に進展
 系統誤差を順調に理解
 年間2500時間
 など

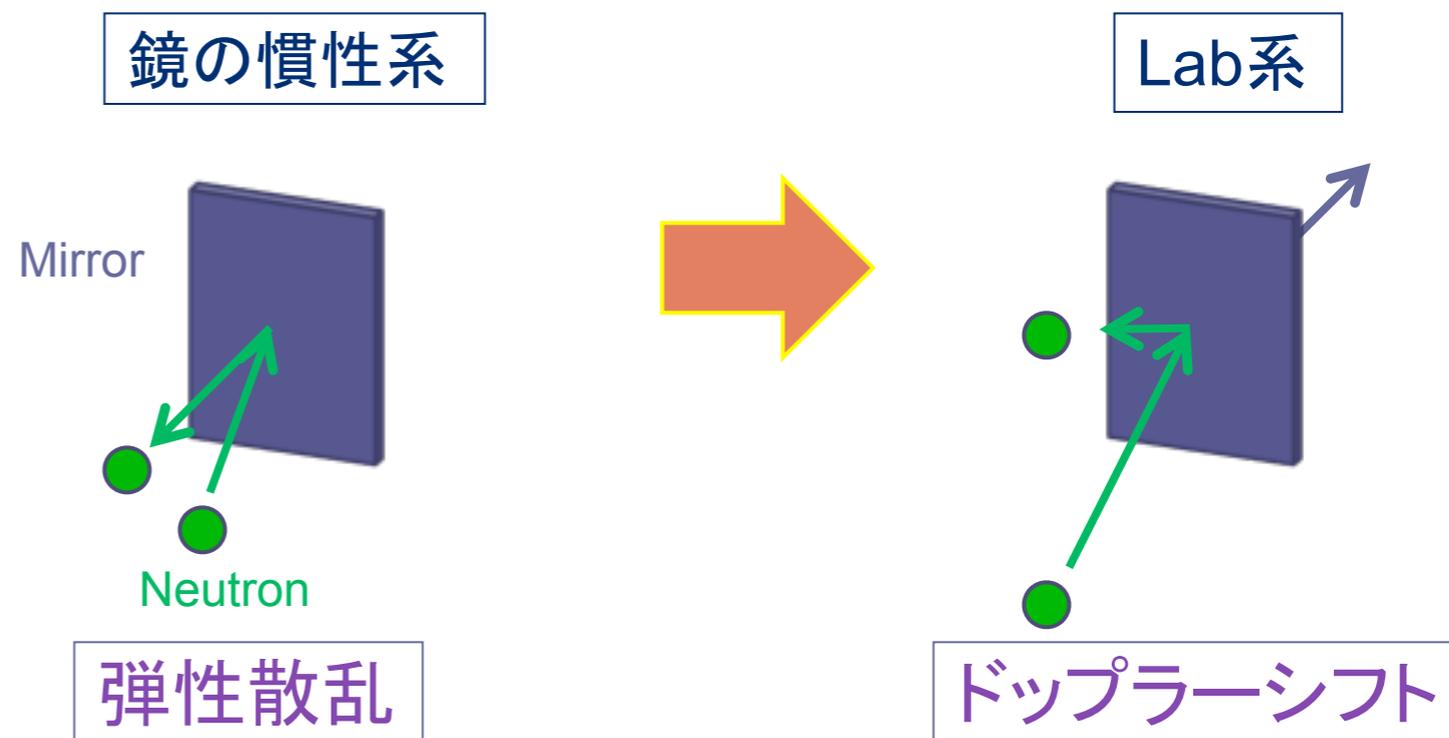
BL05での実証実験

UCN光学素子の開発、実験のために
手軽に使えるUCN源が手元に欲しい

→ BL05 NOPビームライン 非偏極ビームブランチへ
ドップラーシフターを設置した

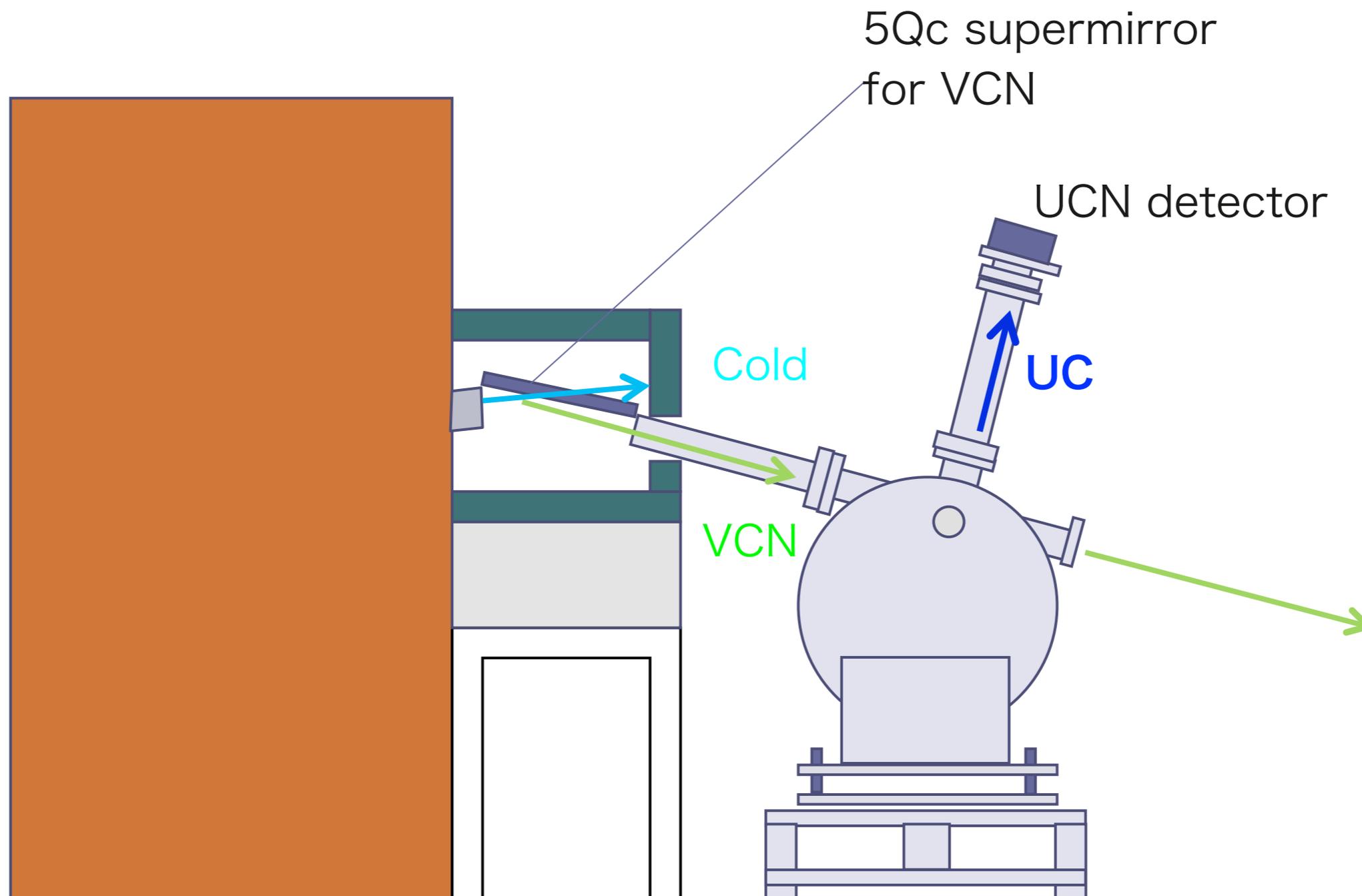
後退する鏡による
反射で中性子を減速

位相空間密度は保存



BL05での実証実験

VCN成分を取り出し、ドップラーシフターで減速

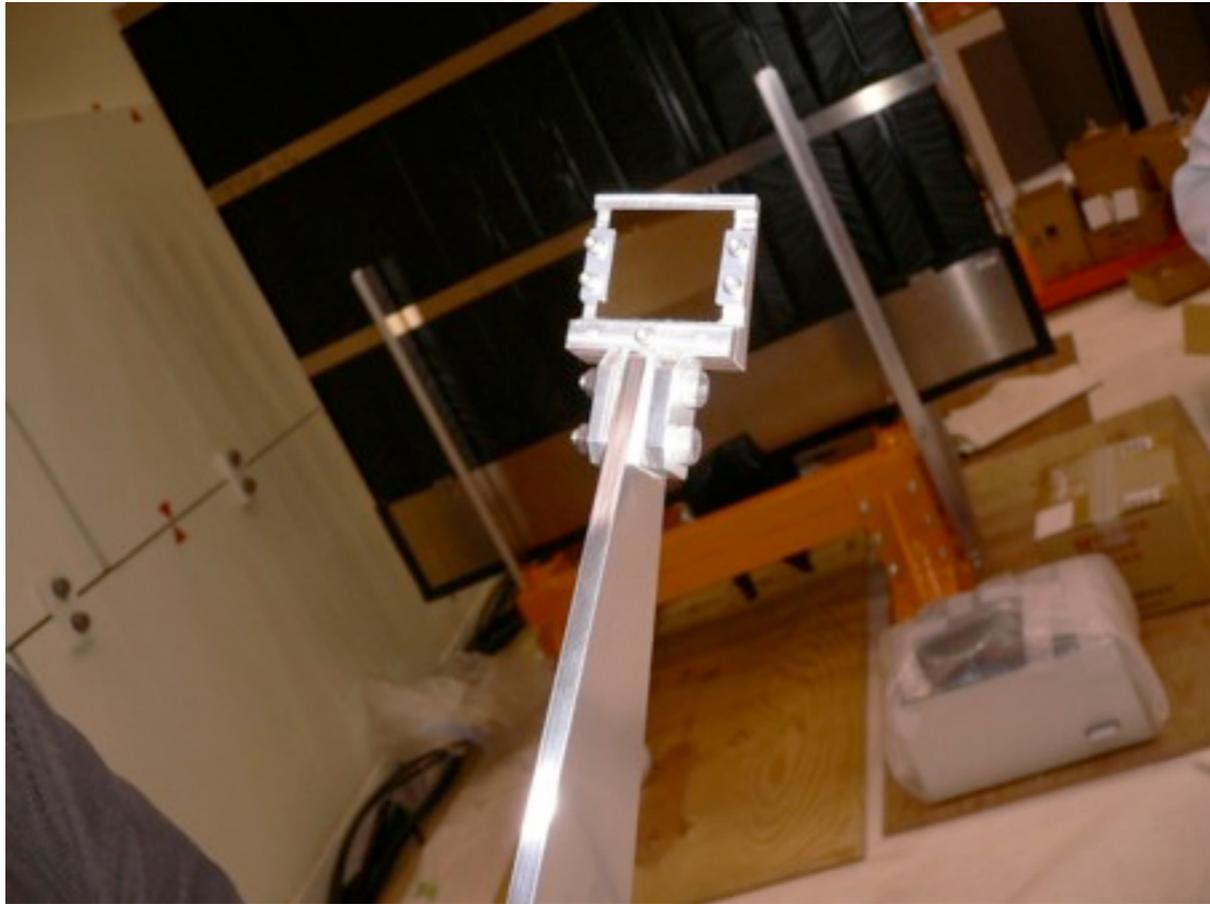


BL05での実証実験



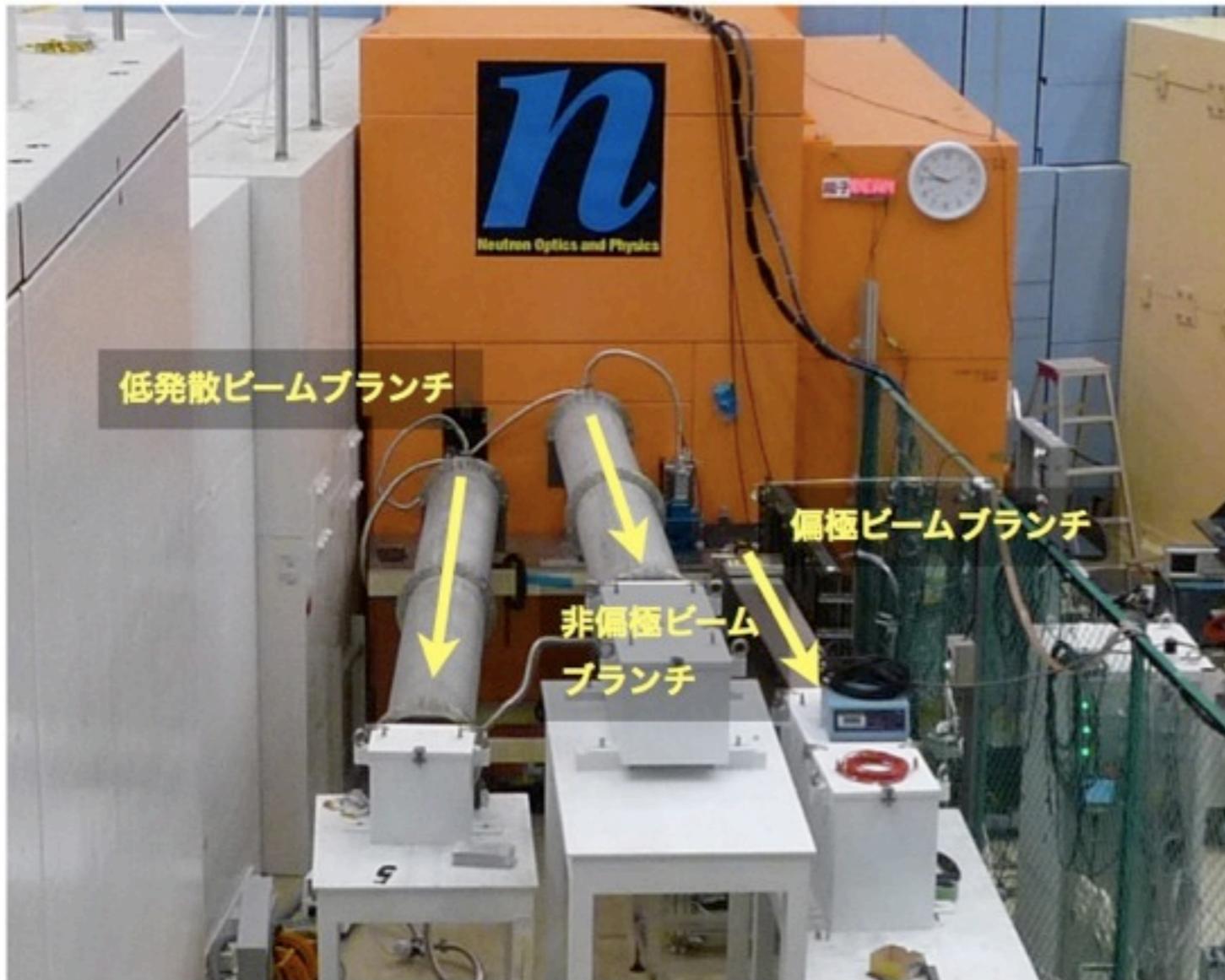
高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いばらき量子ビーム研究センター

BL05での実証実験



m=10高反射率ミラー

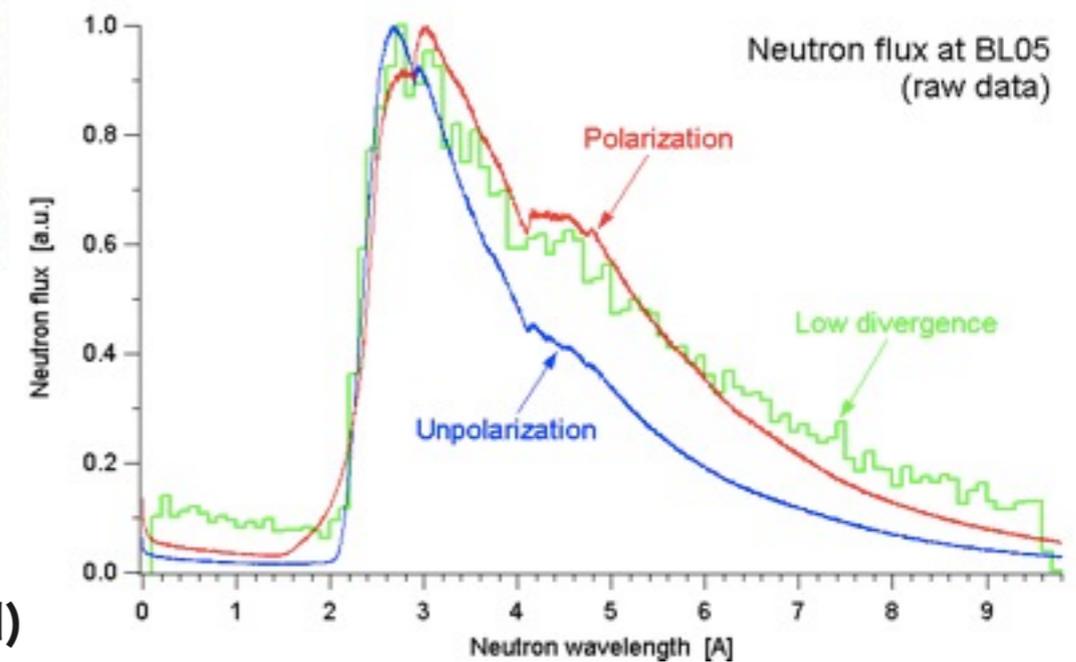
BL05での実証実験



4.3×10^5 n/cm²/s / μ str @MW

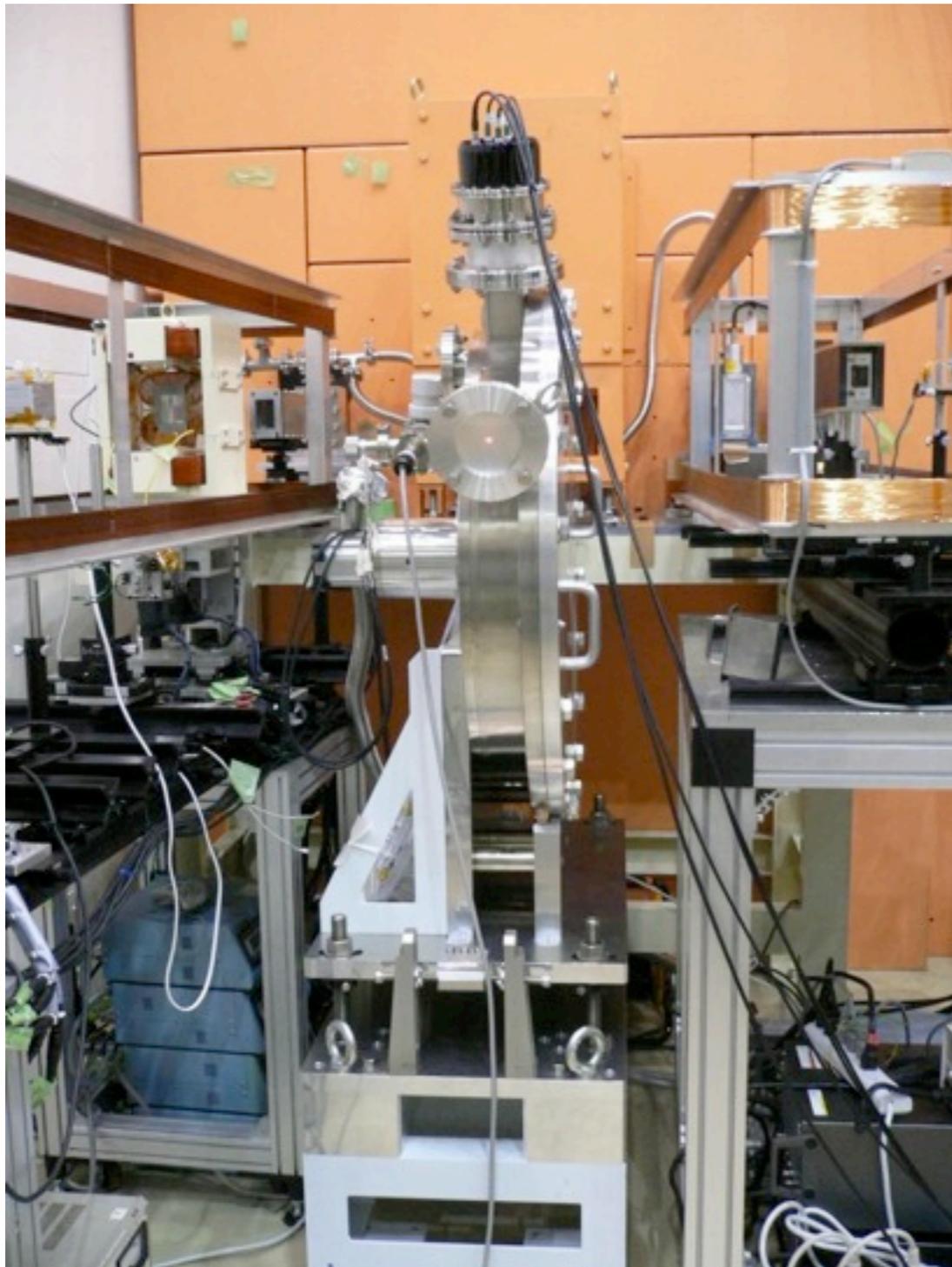
1×10^8 n/cm²/s @MW (5mrad)

4×10^7 n/cm²/s @MW (5mrad)



BL05での実証実験

ドップラーシフターを
非偏極ビームブランチに
インストール

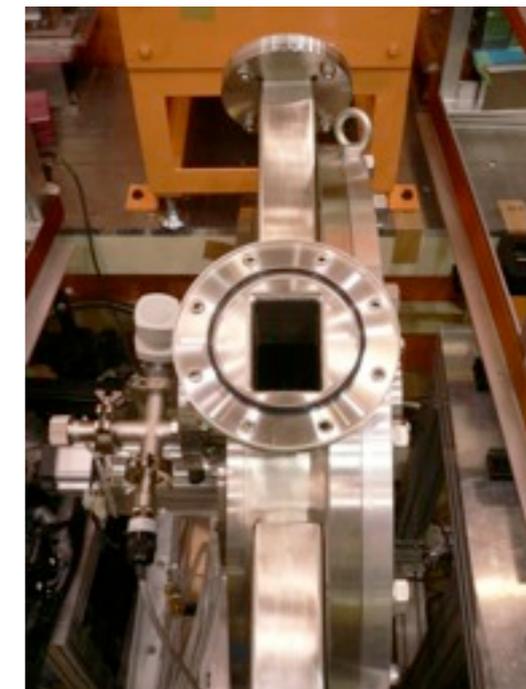
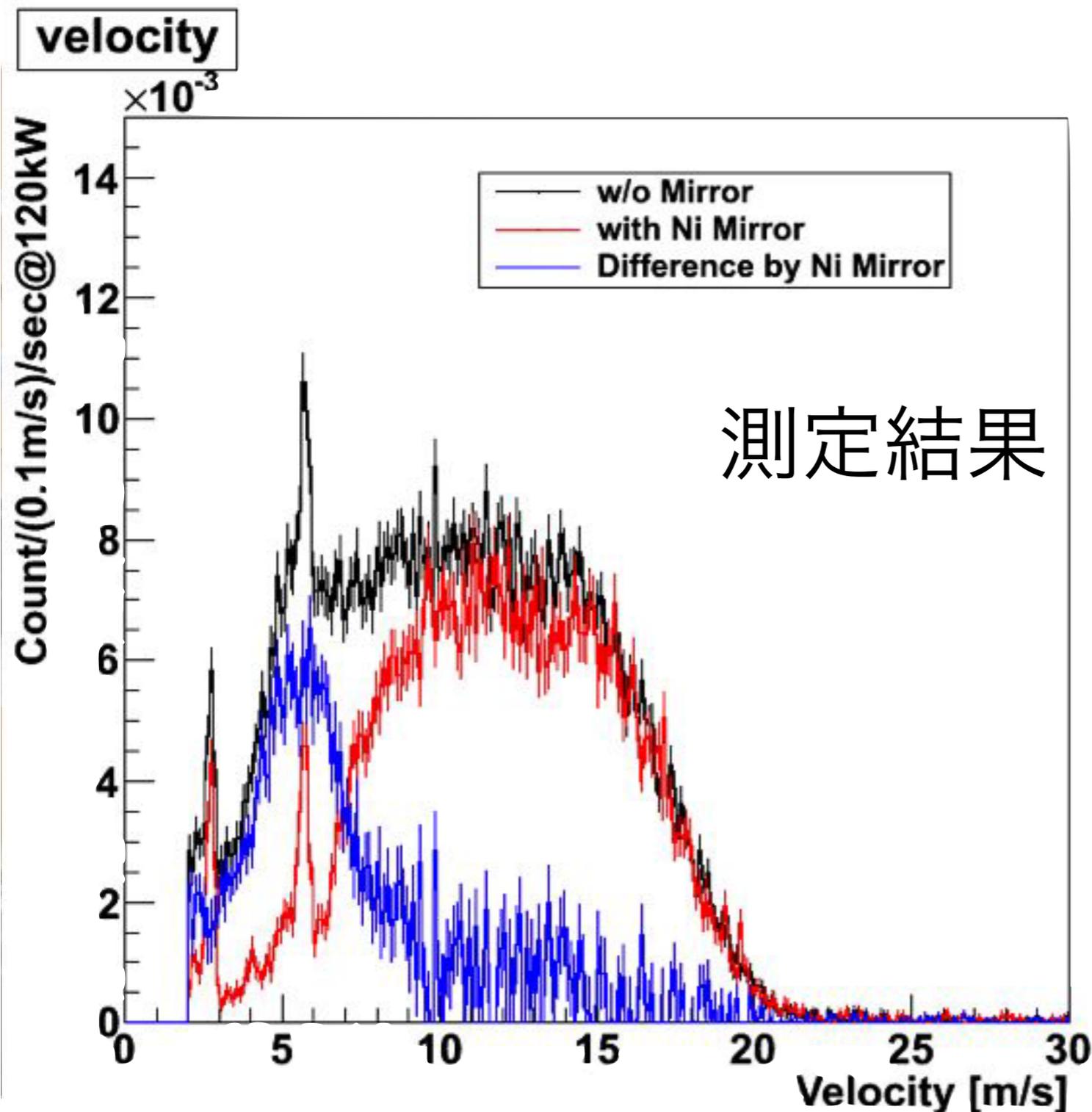


4.3 ×

mr:

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』
2011年8月9日 いらき量子ビーム研究センター

BL05での実証実験



Ni mirror on Si(0.3mm)

Niを
置いて
みる

nEDM at J-PARC まとめ

中性子電気双極子モーメント測定のためには
超冷中性子密度が重要

J-PARC UCN はパルス特性、
特に**瞬間強度が強い**ことを利用
時間集束によって密度を保ってUCNを輸送

輸送技術の開発中 (今後3~4年)

より密度を向上 (EDM精度向上) するには
LINAC の**瞬間 (パルスあたり) 強度を増やす**
(くりかえし周期は0.5Hz - 1Hz)

まとめ

CPの破れの機構解明→beyond standard
のためにEDMが重要

μ , e などとともに総合的理解が必要

nEDMの感度向上には**超冷中性子密度**が重要

磁場測定精度と統計精度の兼ね合い

J-PARCの**瞬間強度**を生かした**輸送系**で高密度UCN源
を実現

光学系の開発を進めている

さらに高密度化には、瞬間強度の増加や光学系の高度
化が必要、磁束計の高性能化が必須

探索から測定へ