

SPring-8-IIのための永久磁石ベース 偏向磁石開発の現状

谷内 努^{A)}, 青木 毅^{A)}, 松原伸一^{A)}
高野史郎^{A, B)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)}

A) 高輝度光科学研究センター

B) 理化学研究所 放射光科学総合研究センター

はじめに

SPring-8アップグレード ⇒ SPring-8-II

＜光：高コヒーレンス化、電子：低エミッタンス化＞

2.4nrad ⇒ 157 pmrad (w/o ID), 100pmrad (w/ ID) (暫定値)

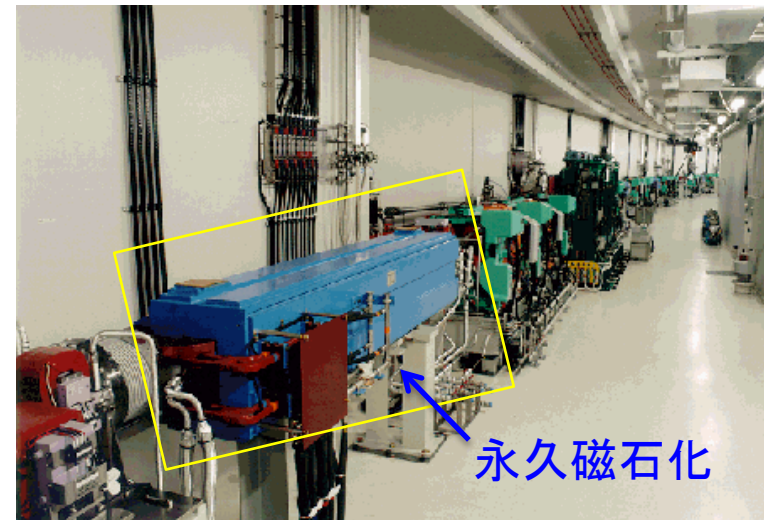
8 GeV ⇒ 6 GeV

2-bend lattice ⇒ 5-bend lattice

2012年 永久磁石ベース偏向磁石を提案
→ 開発スタート

省電力、省スペース、電源・冷却系不要

克服すべき課題



永久磁石化

永久磁石ベース偏向磁石開発

永久磁石

ビーム輸送系、収束系 → 実績あり
 放射光源リングの偏向磁石 → 未実現
 → Sirius, ESRF-EBSでも採用

研究開発課題

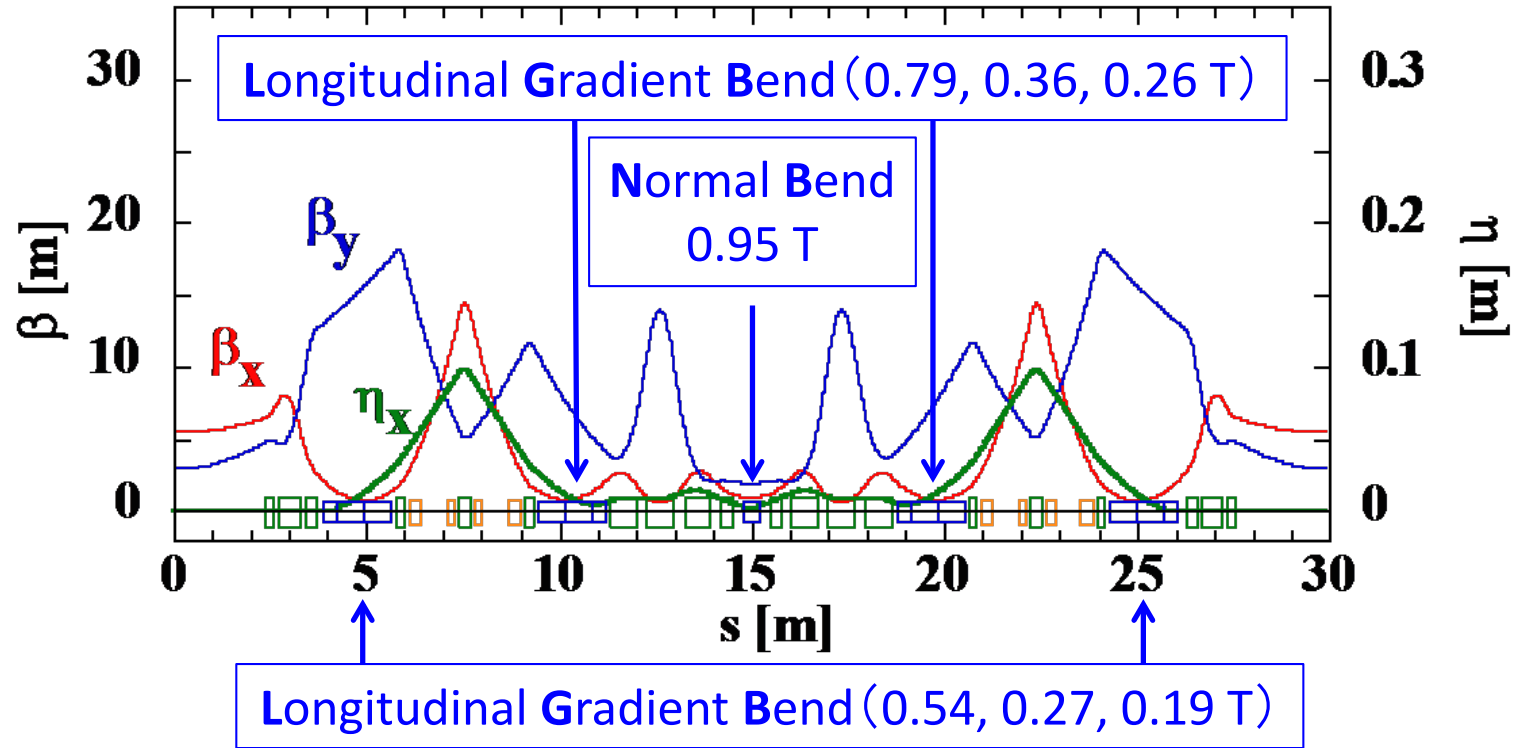
- 磁場強度調整機構 (誤差 $< 5 \times 10^{-4}$ 、初期調整 / 減磁 / エネルギー変更)
- 放射線減磁
- LGB磁場分布を実現する磁気回路
- 永久磁石温度依存性 ($\sim -10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)
- 漏れ磁場評価 vs 高パッキングファクター
- 安全 (吸着事故防止)

↓
 シミュレーション、試作
 原理実証、要素技術開発
 実機サイズ磁気回路製作

試作機～実機サイズ機
 (2012～2016)

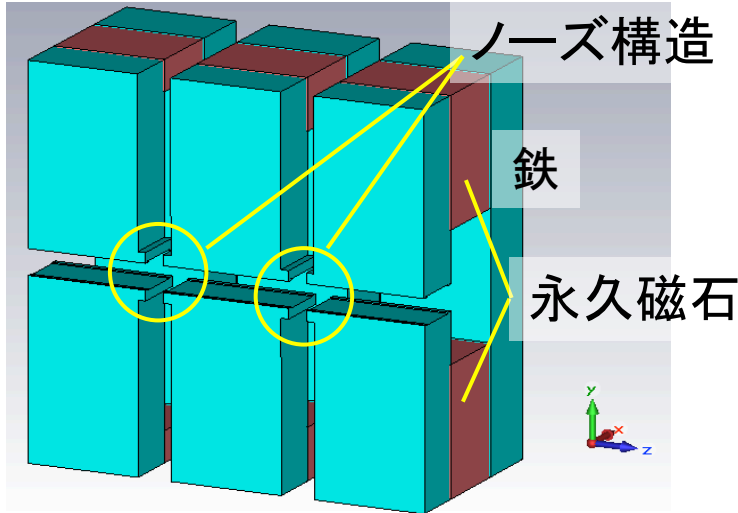


SPring-8-II 5 Bend Lattice



磁石	台数 / cell	合計	(参考)SPring-8
Normal Bend	1	44	88
Longitudinal Gradient Bend	4	176	
Quadrupole	20	880	470
Sextupole	8	352	288

Longitudinal Gradient Bend



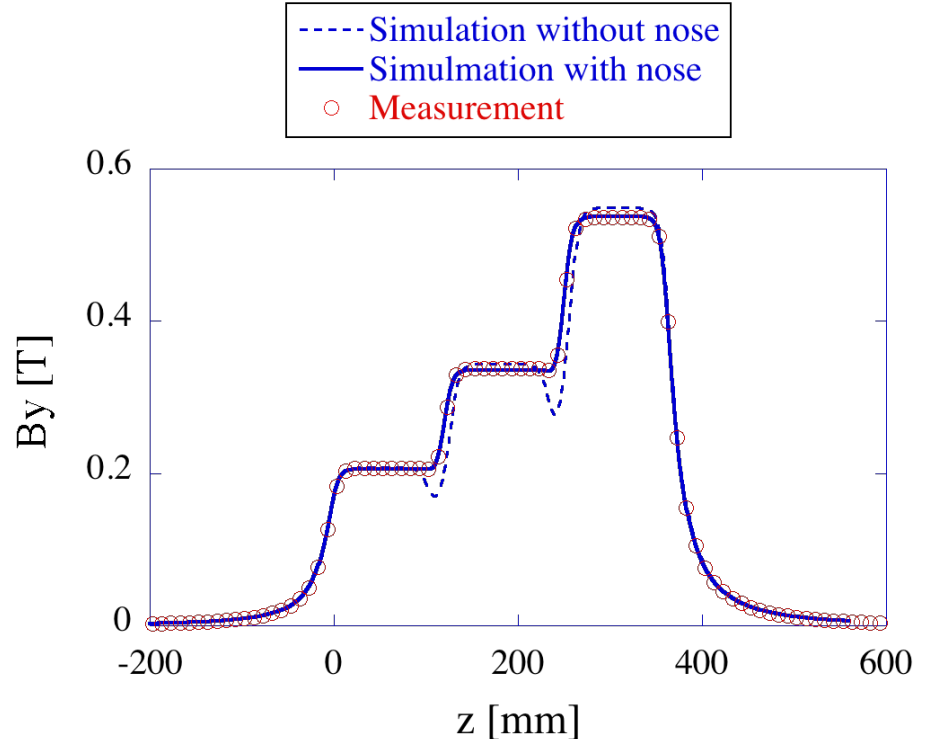
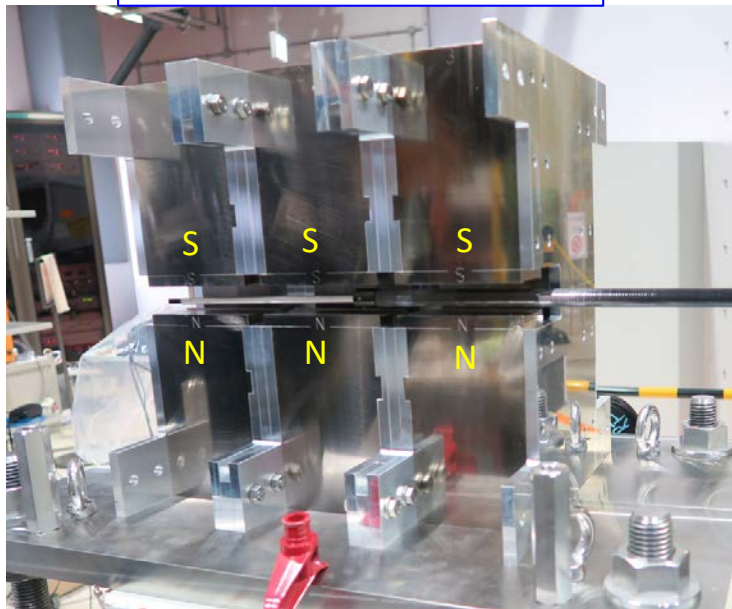
- 3セグメント構成
- 階段状磁場勾配
- セグメント間の磁気クロストーク(勾配小)



磁場分布に凹み

→ ノーズ構造により解決

LGB試作機 (Mini LGB)

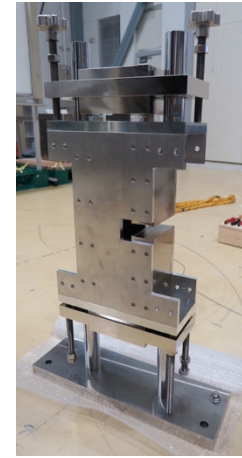


磁場強度調整機構

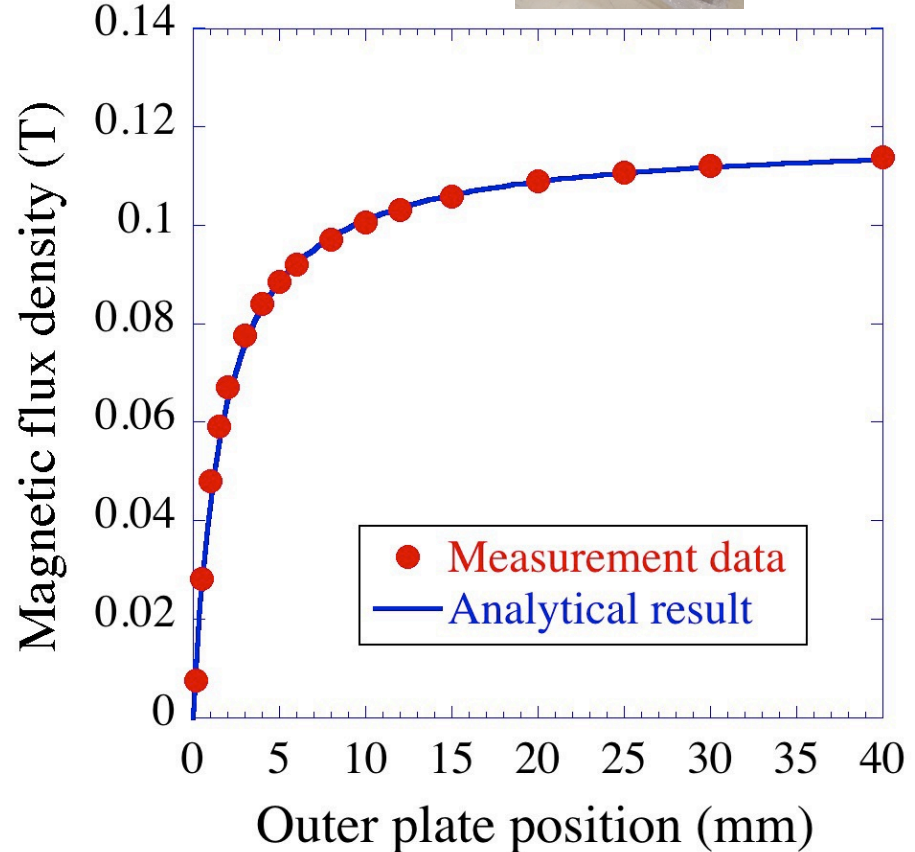
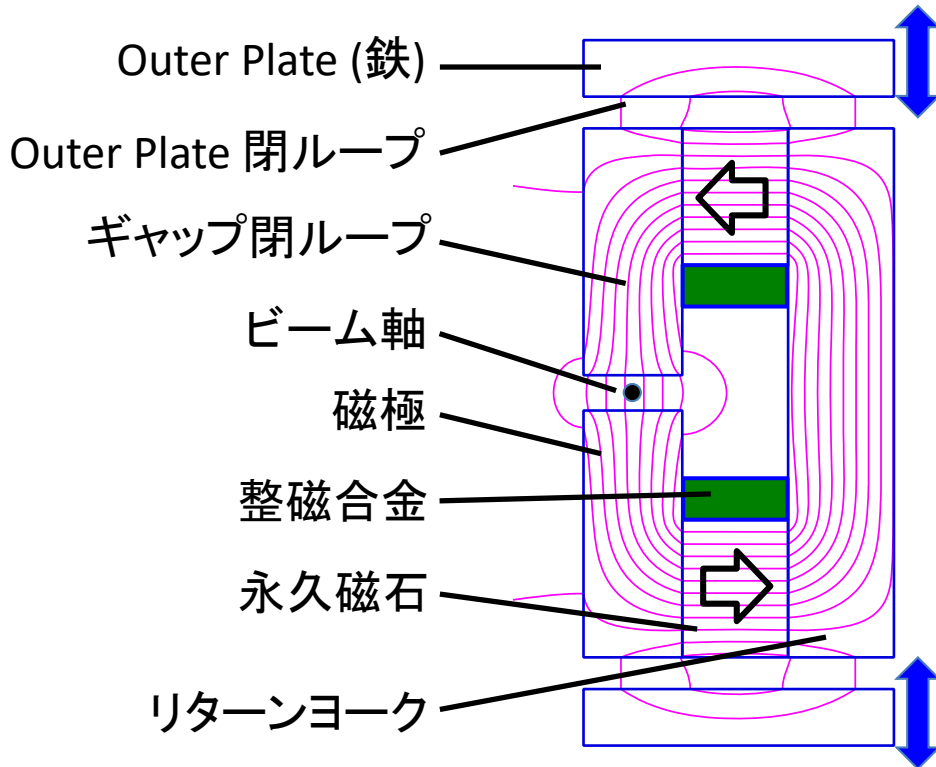
ギャップ磁場:

製造時(着磁、組立精度)のばらつきや経年変化(減磁)

→ **磁場強度調整機構**を採用



Outer Plate による磁場強度調整



温度補償磁気回路

永久磁石の B_r 温度係数

Nd-Fe-B	$-9 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	$-4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$

$$\Phi_{gap} = \Phi_{PM} - \Phi_{shunt}$$

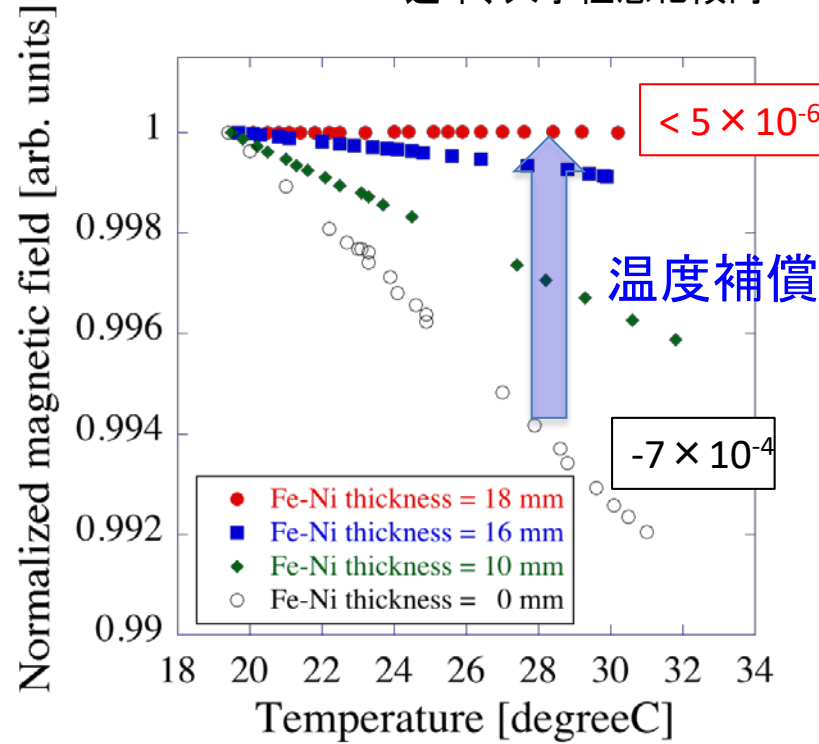
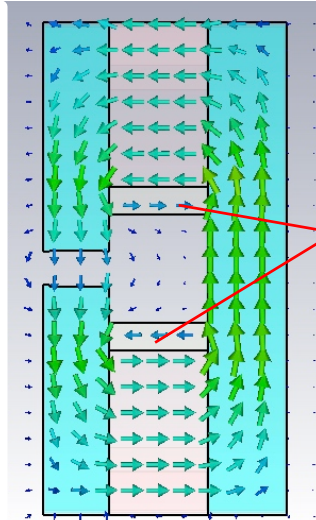
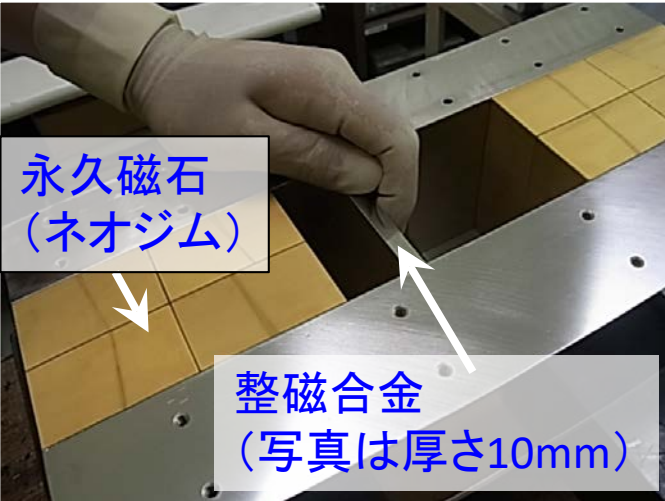
$$= (1 + k_{PM}\Delta T)\Phi_{PM}^0 - (1 + k_{shunt}\Delta T)\Phi_{shunt}^0$$

温度依存性を
消す条件

$$\frac{\Phi_{shunt}^0}{\Phi_{PM}^0} = \frac{k_{PM}}{k_{shunt}}$$

整磁合金* (鉄-ニッケル31%, $-1.3 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$)
の温度依存性を用いて補償可能

* 近年、入手性悪化傾向



放射線減磁

<永久磁石選択>

偏向磁石用永久磁石

残留磁束密度 >1T
保磁力 大

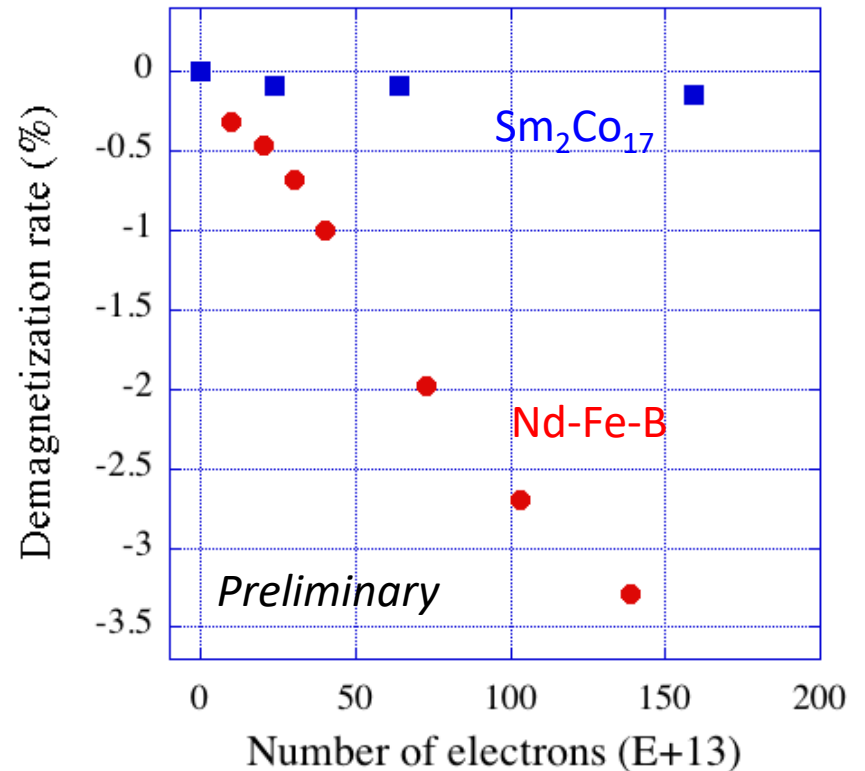


Ne-Fe-B or $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

現時点では $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を選択

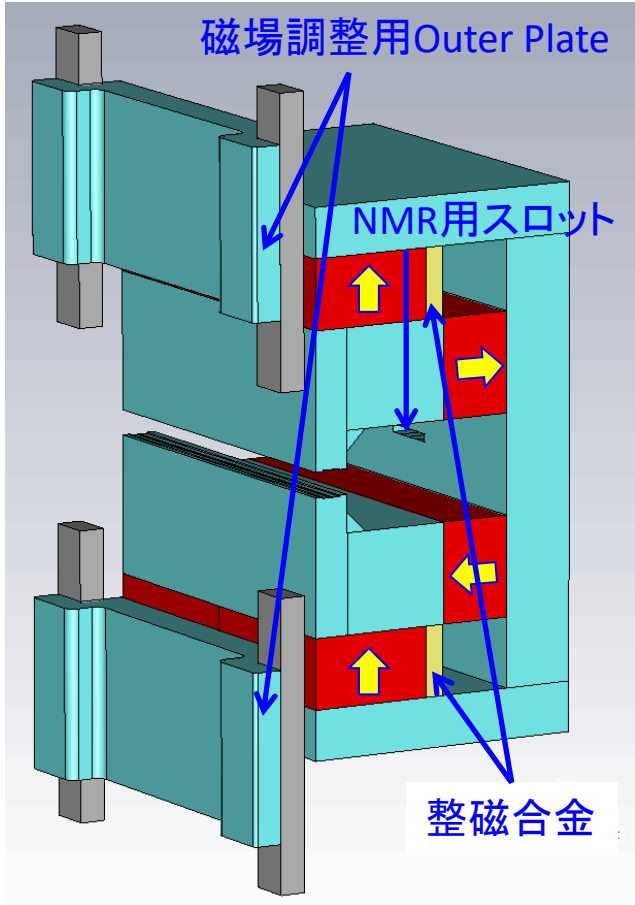
8GeV 電子ビーム照射試験

- NEOMAX35EH annealed at 140 degree for 24 hrs
- LM-32SH without annealing

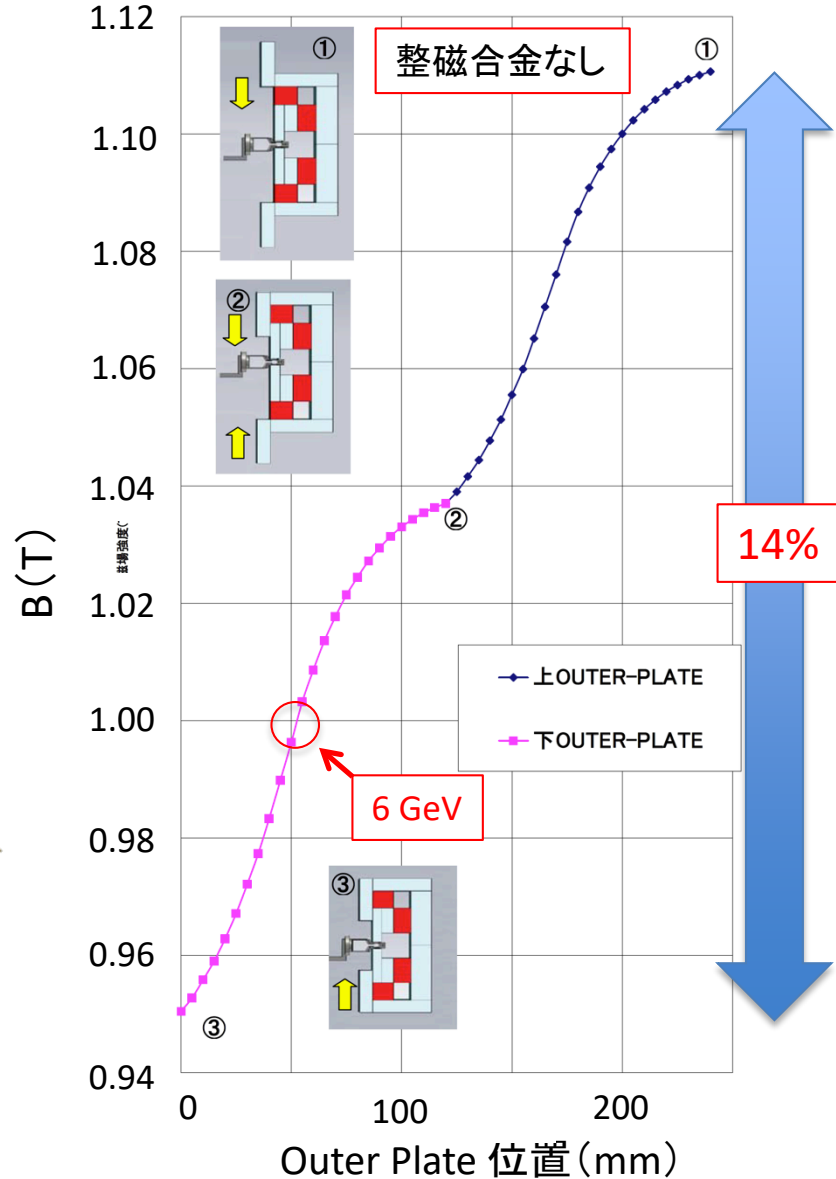


実機サイズ機1: Normal Bend

- $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (TOKIN LM-32SH)
- 磁束密度 0.95 T (SPring-8-II 偏向磁石最大)
- 側面 Outer Plate, 調整範囲 >10%
- 磁石形状: パーミアンス係数 P_c を大きく (3~5)
- NMR用スロット (ギャップ磁場との相対関係)

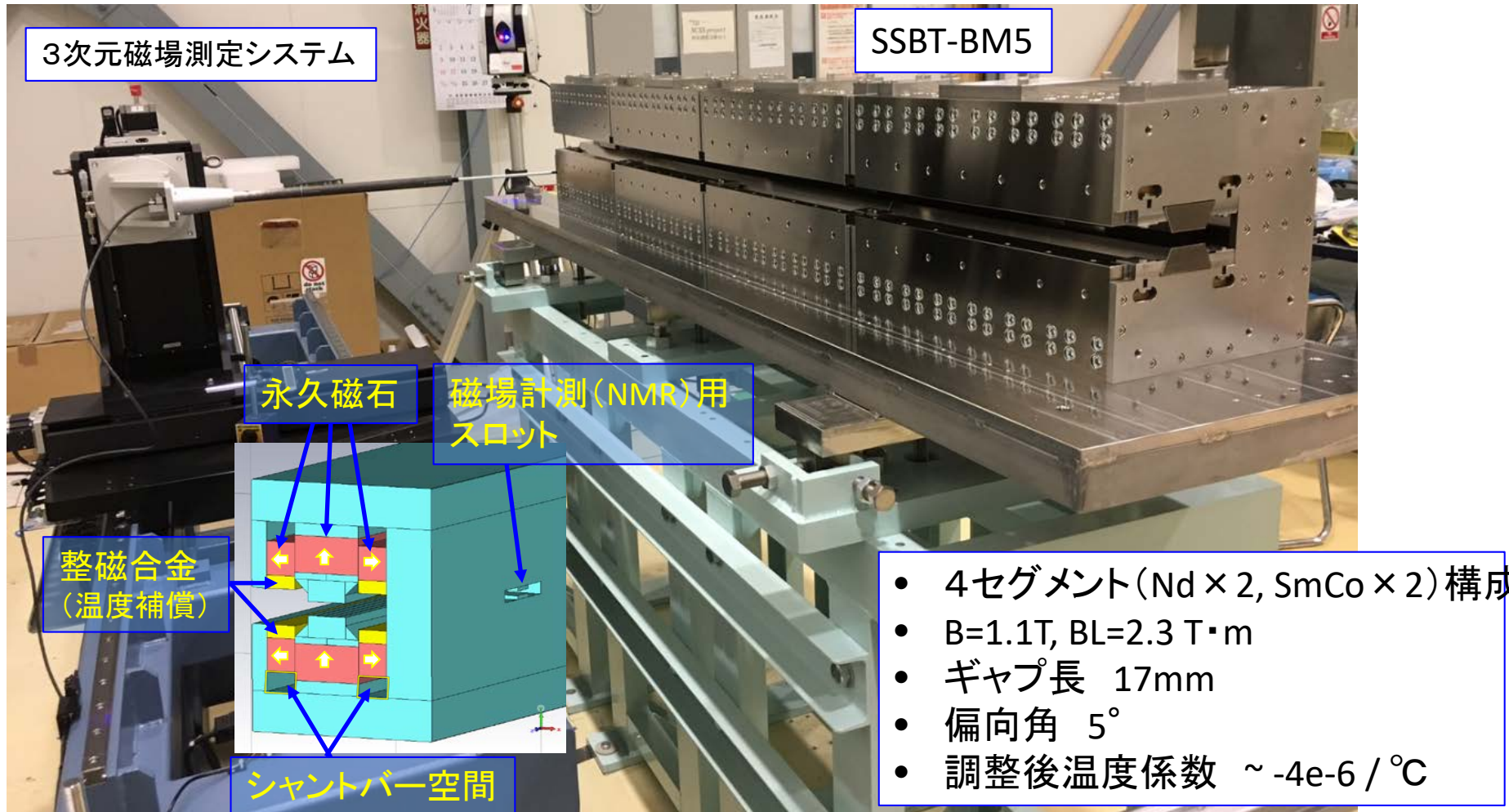


Outer Plate による磁場調整 (実測値)



実機サイズ機2: SPring-8 入射ビーム輸送系偏向磁石

- 蓄積リングのトンネル内放射線実環境における長期運用
- 9月よりトンネル内に設置し、磁場長期安定性検証
- 冬期メンテナンス期間に電磁石と入れ替え、ビーム運用開始



3次元磁場測定システム

SSBT-BM5

永久磁石

磁場計測(NMR)用
スロット

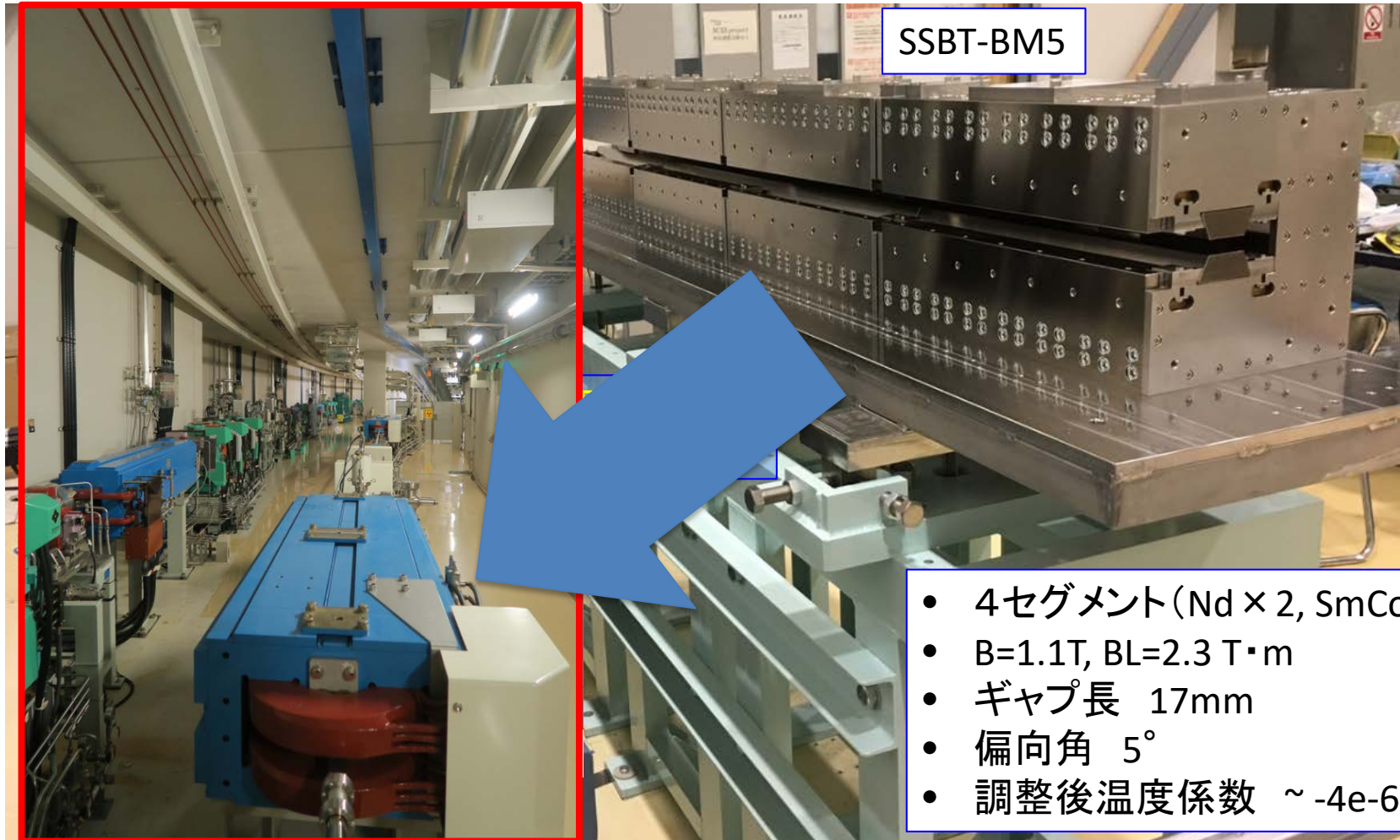
整磁合金
(温度補償)

シャントバー空間

- 4セグメント (Nd × 2, SmCo × 2) 構成
- $B=1.1\text{T}$, $BL=2.3\text{ T}\cdot\text{m}$
- ギャップ長 17mm
- 偏向角 5°
- 調整後温度係数 $\sim -4\text{e-}6 / ^\circ\text{C}$

実機サイズ機2: SPring-8 入射ビーム輸送系偏向磁石

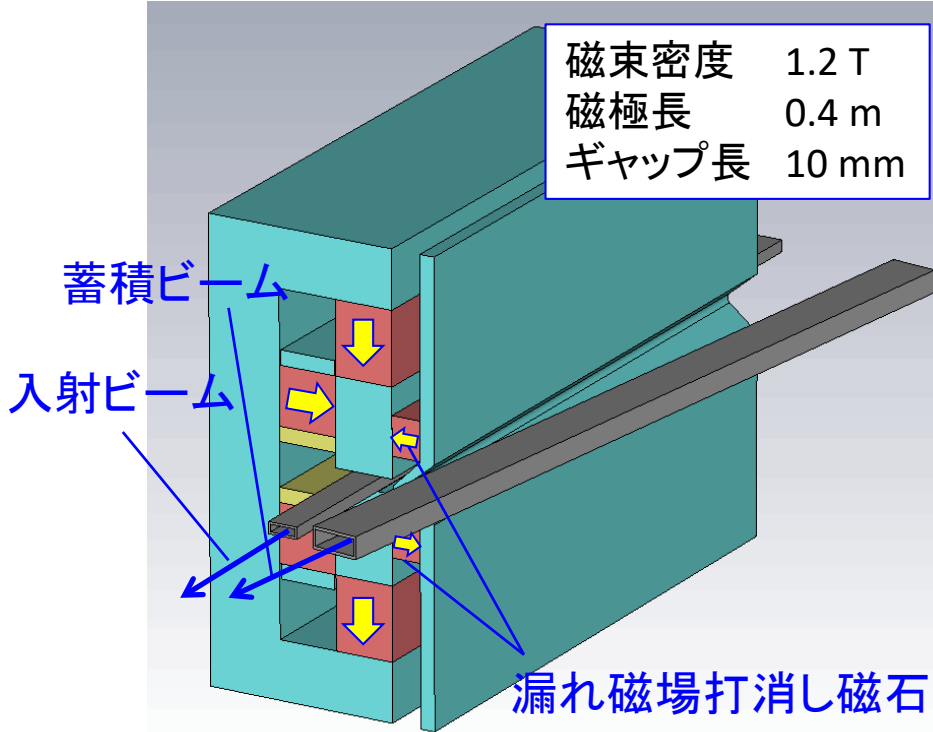
- 蓄積リングのトンネル内放射線実環境における長期運用
- 9月よりトンネル内に設置し、磁場長期安定性検証
- 冬期メンテナンス期間に電磁石と入れ替え、ビーム運用開始



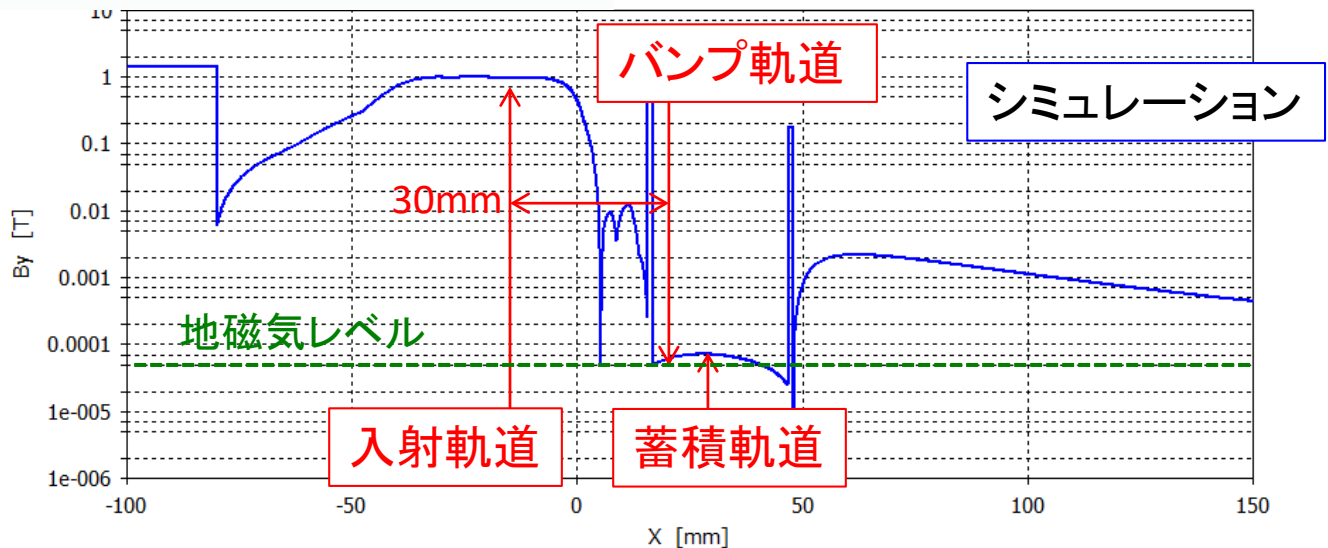
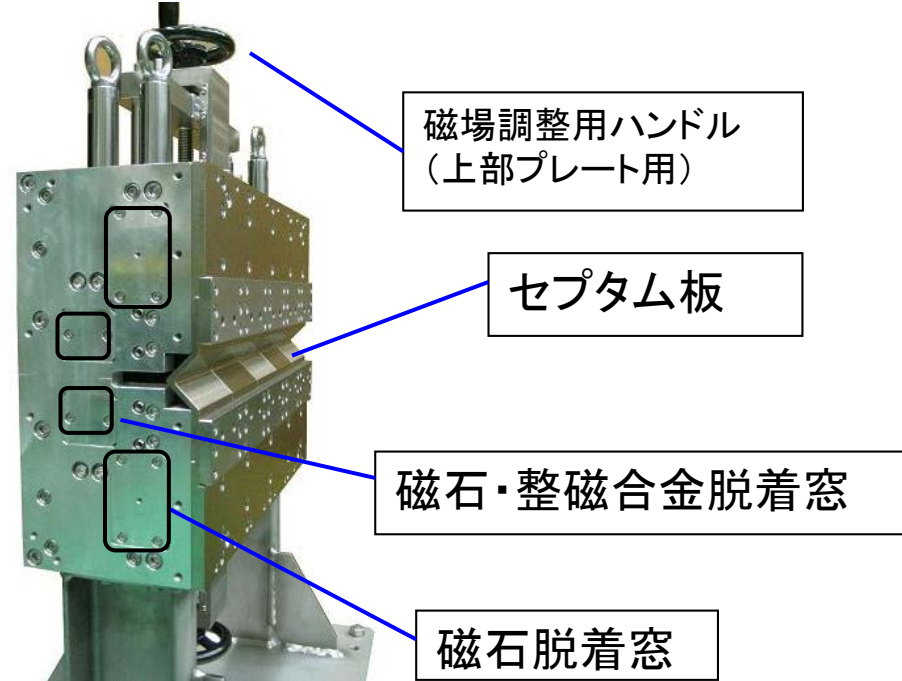
SSBT-BM5

- 4セグメント (Nd × 2, SmCo × 2) 構成
- $B=1.1\text{T}$, $BL=2.3\text{ T}\cdot\text{m}$
- ギャップ長 17mm
- 偏向角 5°
- 調整後温度係数 $\sim -4\text{e-}6 / ^\circ\text{C}$

実機サイズ機3: 永久磁石DCセプタムの試作



TUP070: 高野, "永久磁石によるDCセプタムの開発"



安全対策

永久磁石ベース偏向磁石R&D

昨年度までの製作台数 14台

吸着事故・機器破損を防止するための安全対策

強磁場注意表示

身につけた磁性体を外す

強磁場警報器 (Mag Watcher) を携帯

非磁性工具 (チタン、ベリリウム銅) を使用

漏れ磁場領域に非磁性カバー

SPring-8-IIでは、200台以上の永久磁石が並ぶ加速器収納部に様々な作業者が入室

安全確保



警告音, 発光
磁束密度の数値表示



まとめ



- SPring-8-II に向け、**永久磁石ベース偏向磁石**を開発中。
- ラティス磁石として実現するための課題をシミュレーション・試作により解決し、**要素技術開発**をほぼ完了。
(磁場調整機構, 温度補償, 放射線減磁, 漏れ磁場, . . .)
- **実機サイズ機**の試作・検証が進行中。
(Normal Bend, LGB, SSBT輸送系偏向磁石, DCセプタム)
- 蓄積リング**放射線実環境**におけるSSBT輸送系偏向磁石の**長期実運用試験**を予定。
- 永久磁石磁気回路周辺での**作業安全**について指針の確立を目指す。

