

HL-LHC計画と KEKにおける超伝導磁石開発

高エネルギー加速器研究機構

超伝導低温工学センター

中本 建志

講義内容

前半： 基礎的な“いろは”

- 加速器用超伝導電磁石の設計、構造、製作

後半： ケーススタディ

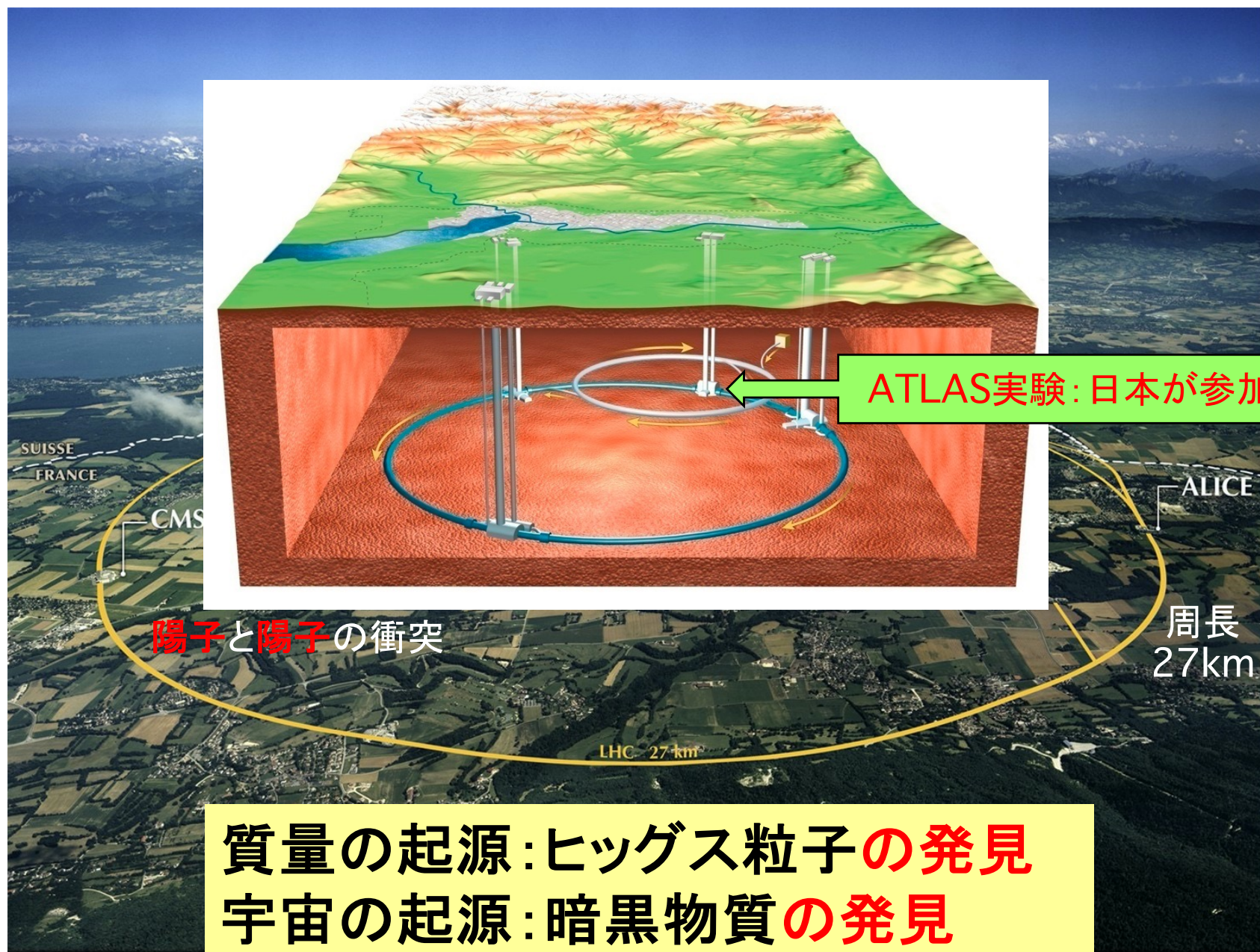
- LHC最終ビーム収束用4極磁石： MQXA
- J-PARCニュートリノビームライン磁石： SCFM
- HL-LHCビーム分離用大口径双極磁石： MBXF

LHC最終ビーム収束用4極磁石： MQXA

CERN-LHC: Large Hadron Collider

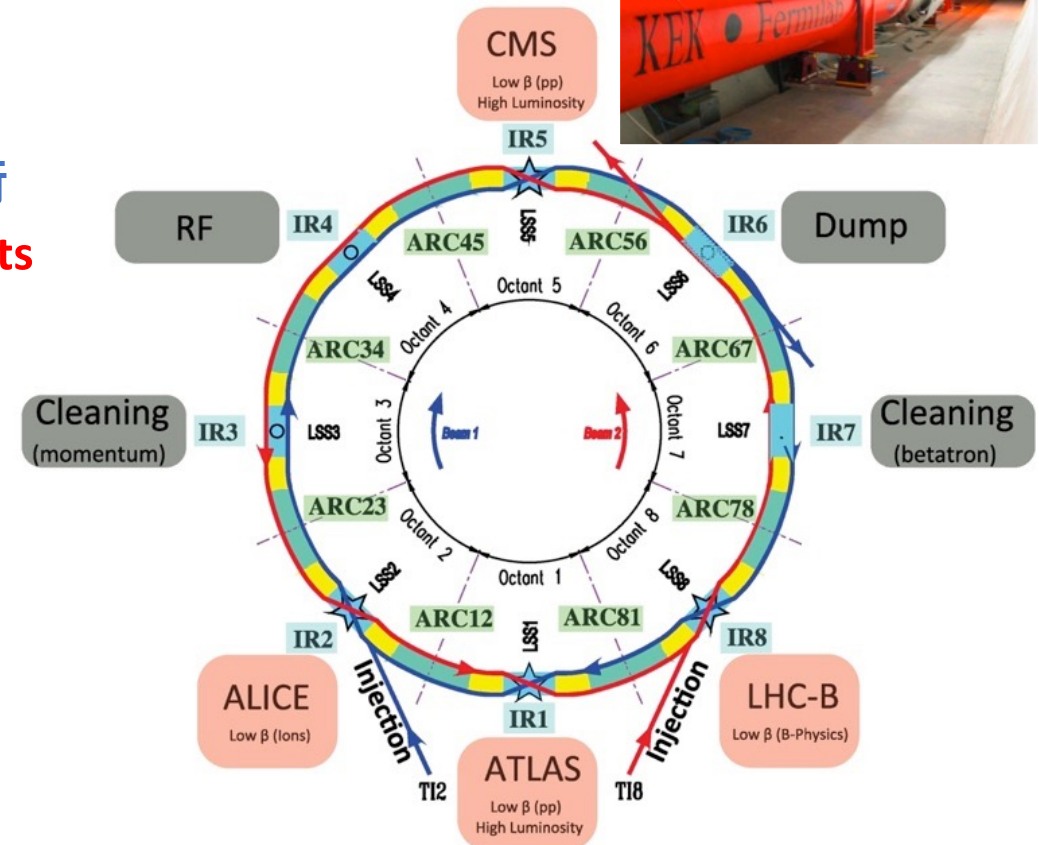


CERN-LHC: Large Hadron Collider



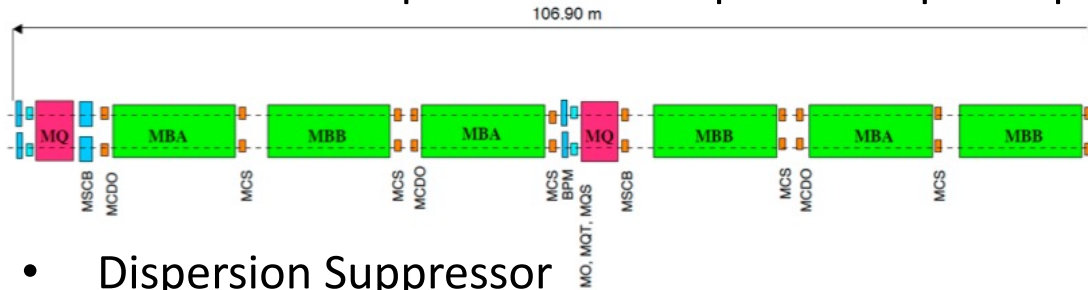
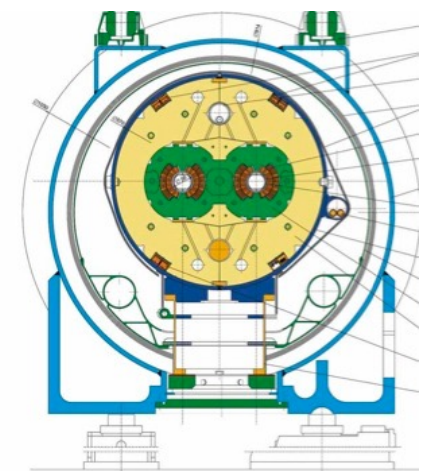
CERN-LHC: Large Hadron Collider

- 周長: 26.7 km
- 入射エネルギー(SPS): 450 GeV
- p + p Collision Energy:
 - 7 + 7 TeV (design)
- **ヘリウム漏洩事故 (2008)**
 - 4 + 4 TeV (2012)
- **磁石間接続、安全対策 in LS1 (2013-2014)**
 - **6.5 + 6.5 TeV (2016)**
- 設計ルミノシティ: $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- キーテクノロジー: 超伝導磁石、低温技術
 - 2 in 1 main dipole at **8.3T: 1232 magnets**
 - 超流動ヘリウム冷却: 100トン, **1.9 K**
 - 冷却重量: 35,000トン
 - ヘリウム冷凍機プラント: 40MW
- LHC建設費: > 5000 MCHF
- **日本は1995年からLHC建設参加**
 - ビーム衝突点四極磁石
 - ATLAS検出器

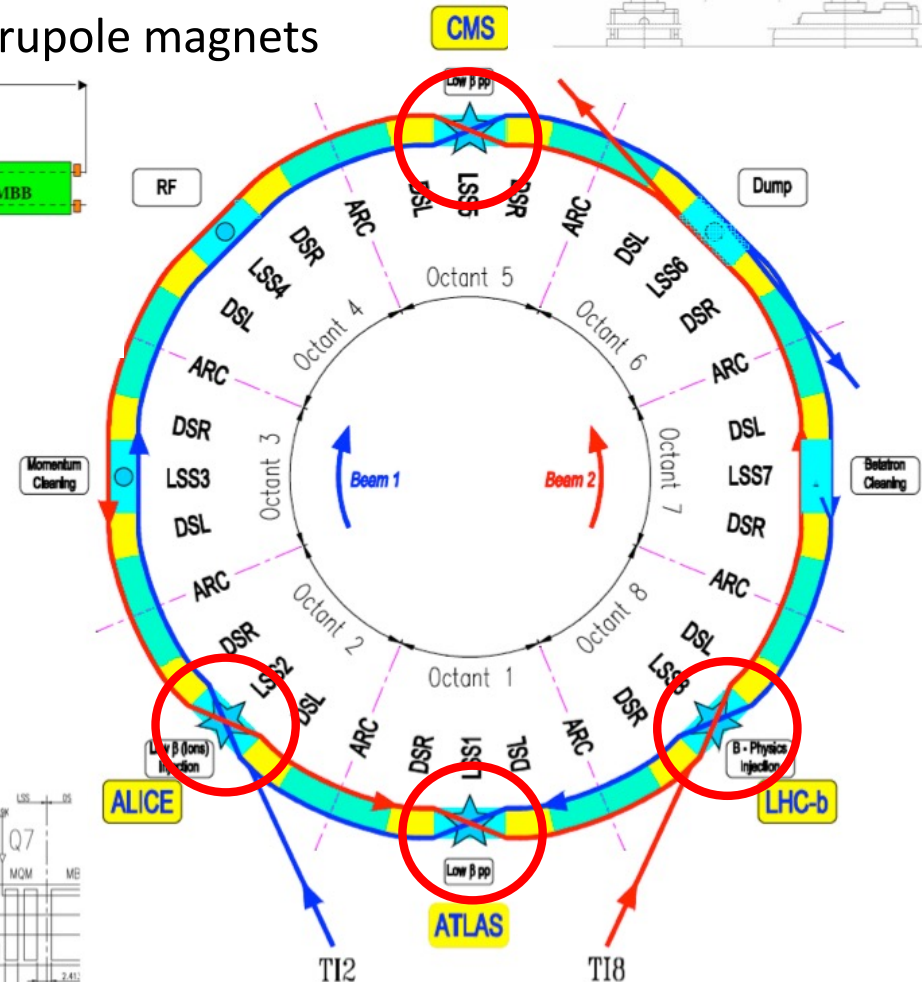


LHC: アーク部と直線挿入部 (衝突点)

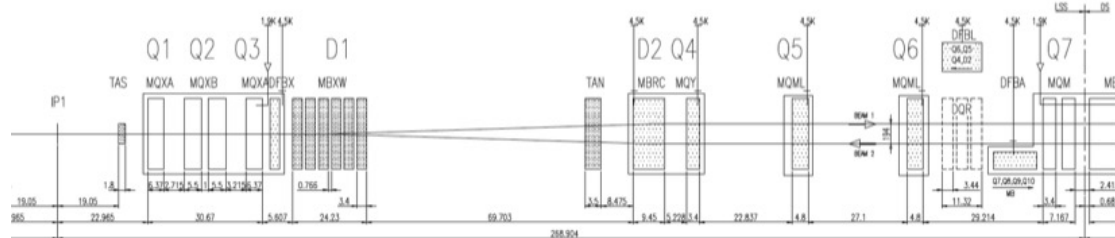
- 8 Arcs
 - 23 * a single cell: a FODO lattice (90° phase advance)
 - A single cell includes: 6 dipoles + 2 quads.
 - Two beams separated by 194 mm.
 - Concept of “2 in 1” dipole and quadrupole magnets



- Dispersion Suppressor
- 8 LSS (~530 m)
 - 4 experimental insertions
 - 1 for beam accelerations (RF)
 - 2 for beam collimation
 - 1 for beam dump



ATLAS



日本の貢献 最終ビーム収束用四極磁石

Q1 & Q3 (MQXA): 高エネ研 (16台)

Q2a & Q2b (MQXB): 米国フェルミ研 (16台)

磁場勾配 = 215 T/m, コイル口径 = 70 mm **~ 9 T**

磁石長さ = 5.5 or 6.37 m, 運転温度 = 1.9 K

誤差磁場 < 1 unit (10^{-4})

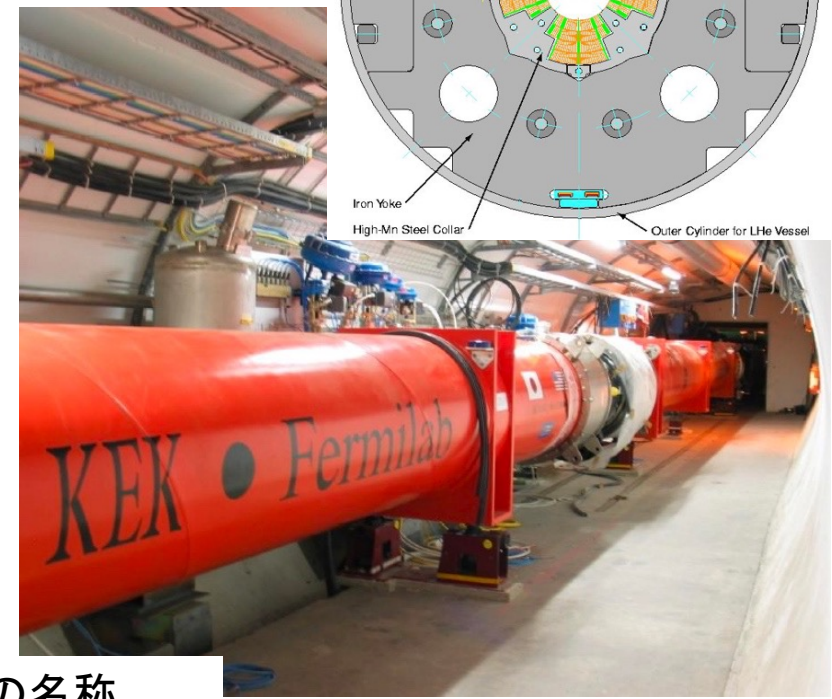
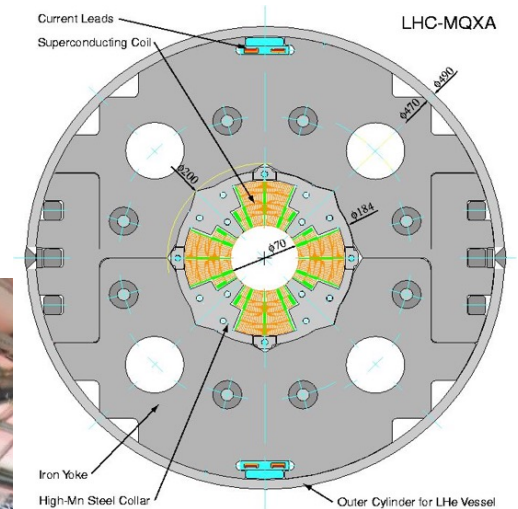
ビームからの入熱(放射線): ~ 10 W/m

量産磁石製造: 東芝

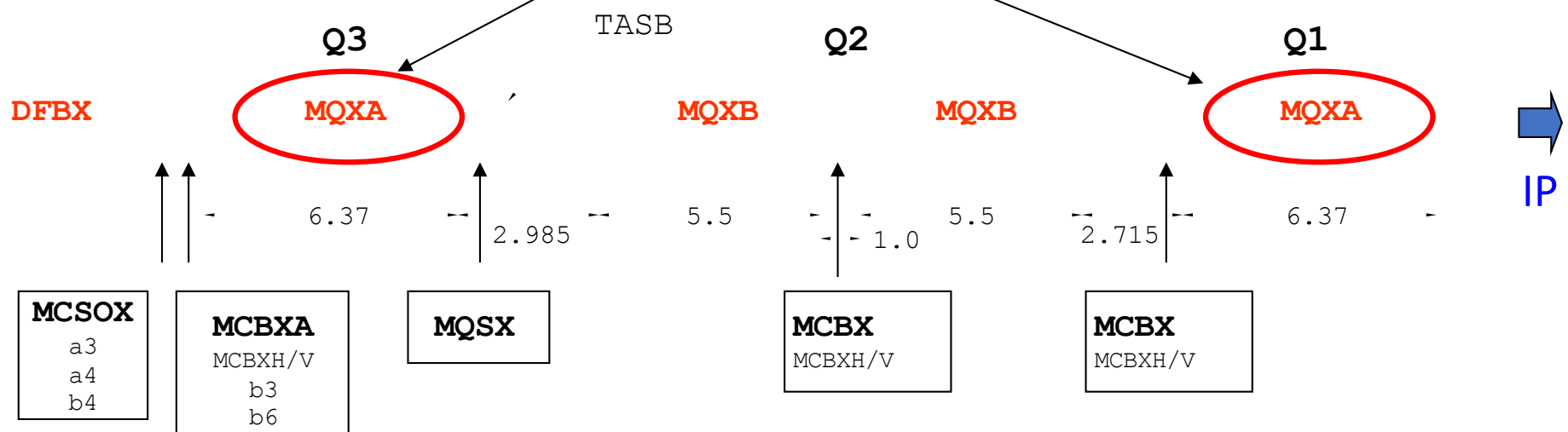
超伝導ケーブル: 古河電工

精密打ち抜き: アキタファインブランキング

電気絶縁: 有沢製作所

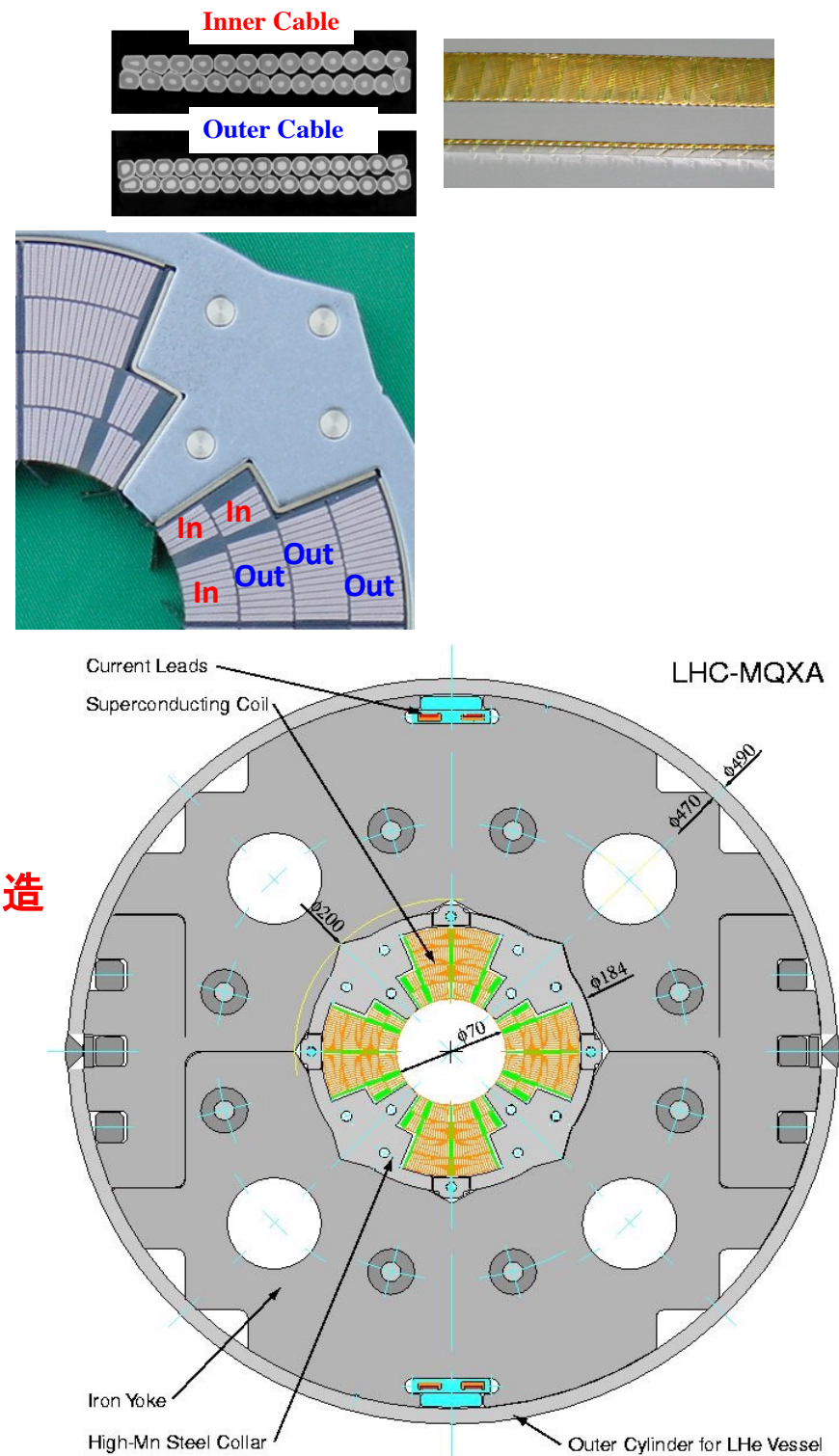


高エネ研担当磁石の名称

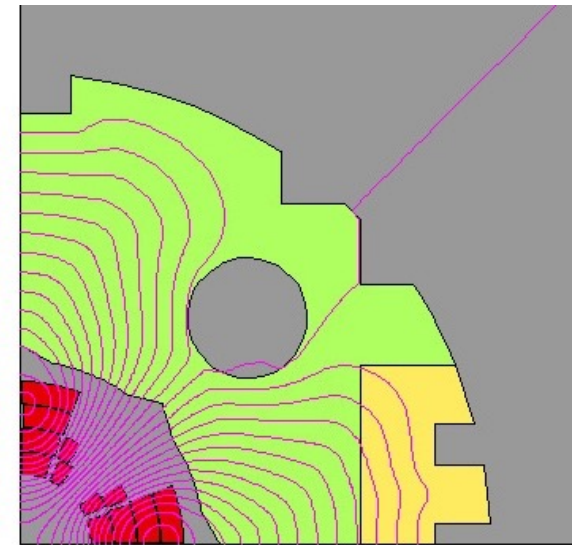
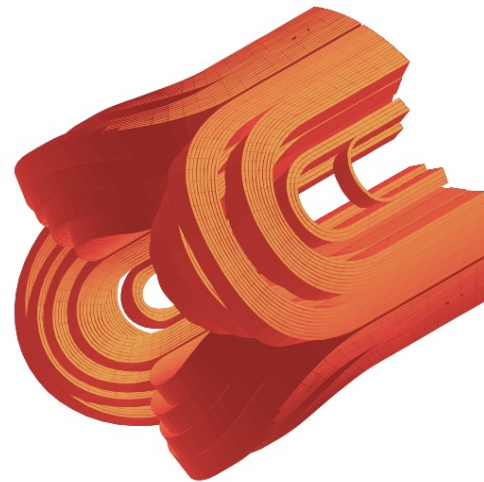


MQXA磁石の特徴

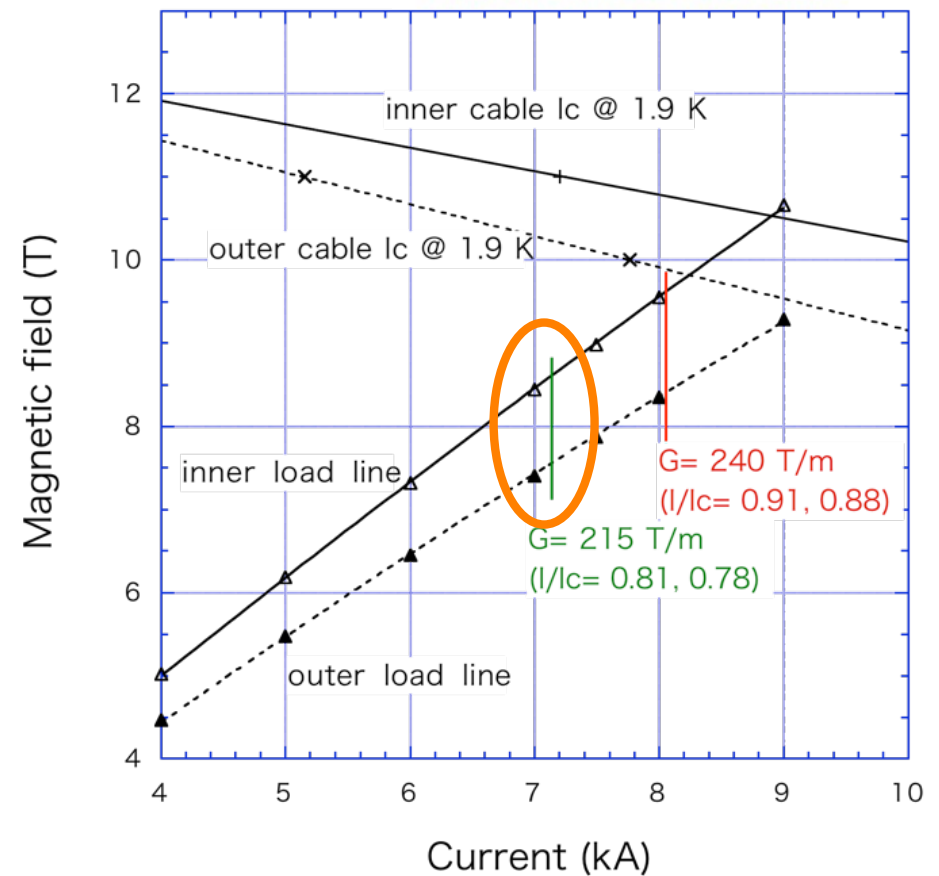
- 4層コイル構造
 - 2層のダブルパンケーキコイル
 - 2種類の超伝導ケーブル
 - Inner & outer SC cables
 - 磁場の低い外側の電流密度を高く
- 非磁性鋼スペーサーカラー
 - High-Mn 鋼(JFE)
 - 透磁率が低い&安定
- 鉄ヨーク
 - 水平分割構造
 - キー止め構造
 - 超伝導コイルへの予備応力 & 機械支持構造
 - シンプルかつ経済的な組立
 - EFE-X(JFE)
 - 低炭素鋼+高強度(耐力220MPa以上)
- 高精度打ち抜き(アキタファインブランキング)
 - スペーサーカラー&鉄ヨーク
 - 公差20~50 μ m以下の大量打ち抜き



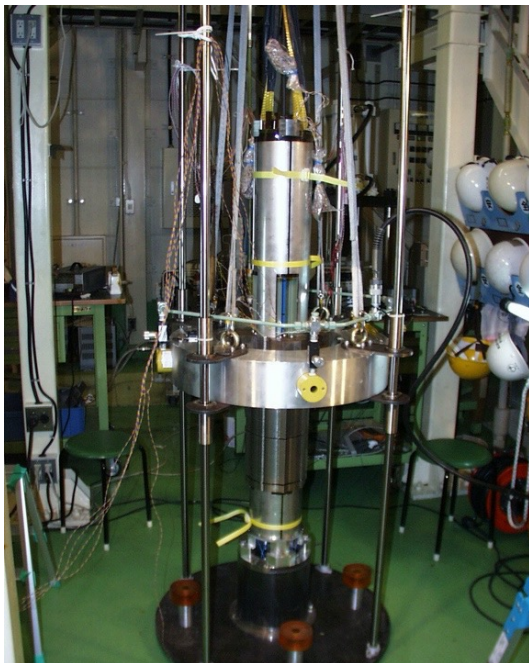
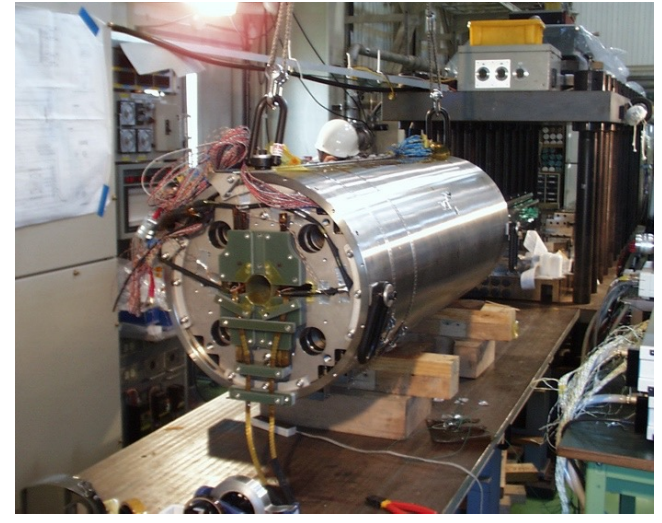
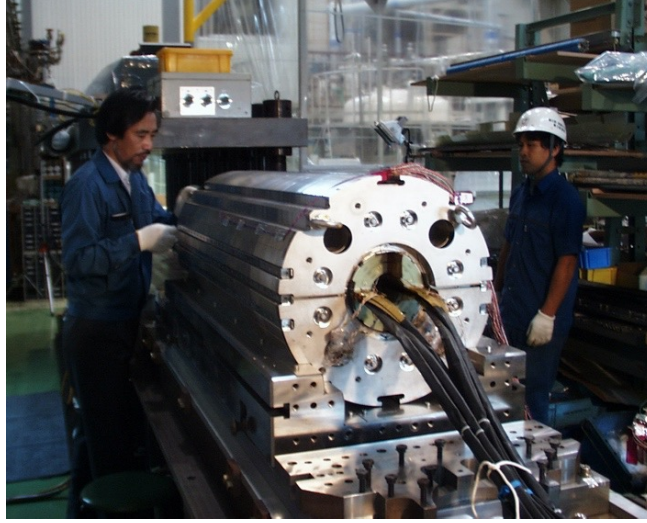
主要設計パラメーター



定格磁場勾配	215 T/m
コイル内径	70mm
鉄ヨーク直径	470 mm
ヘリウムベッセル	490 mm
磁場長	6.37 m
コイルピーク磁場	8.63 T
定格電流	7150 A
運転負荷比	81 %
インダクタンス	87.9 mH
磁気エネルギー	2.24 MJ
電磁力 (1/8コイル)	
ΣF_x	1.19 MN/m
ΣF_y	-1.37 MN/m

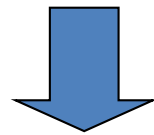


1mモデル磁石(5台)の所内開発



所内開発

設計、部品調達、治具開発、
モデル磁石製作、試験

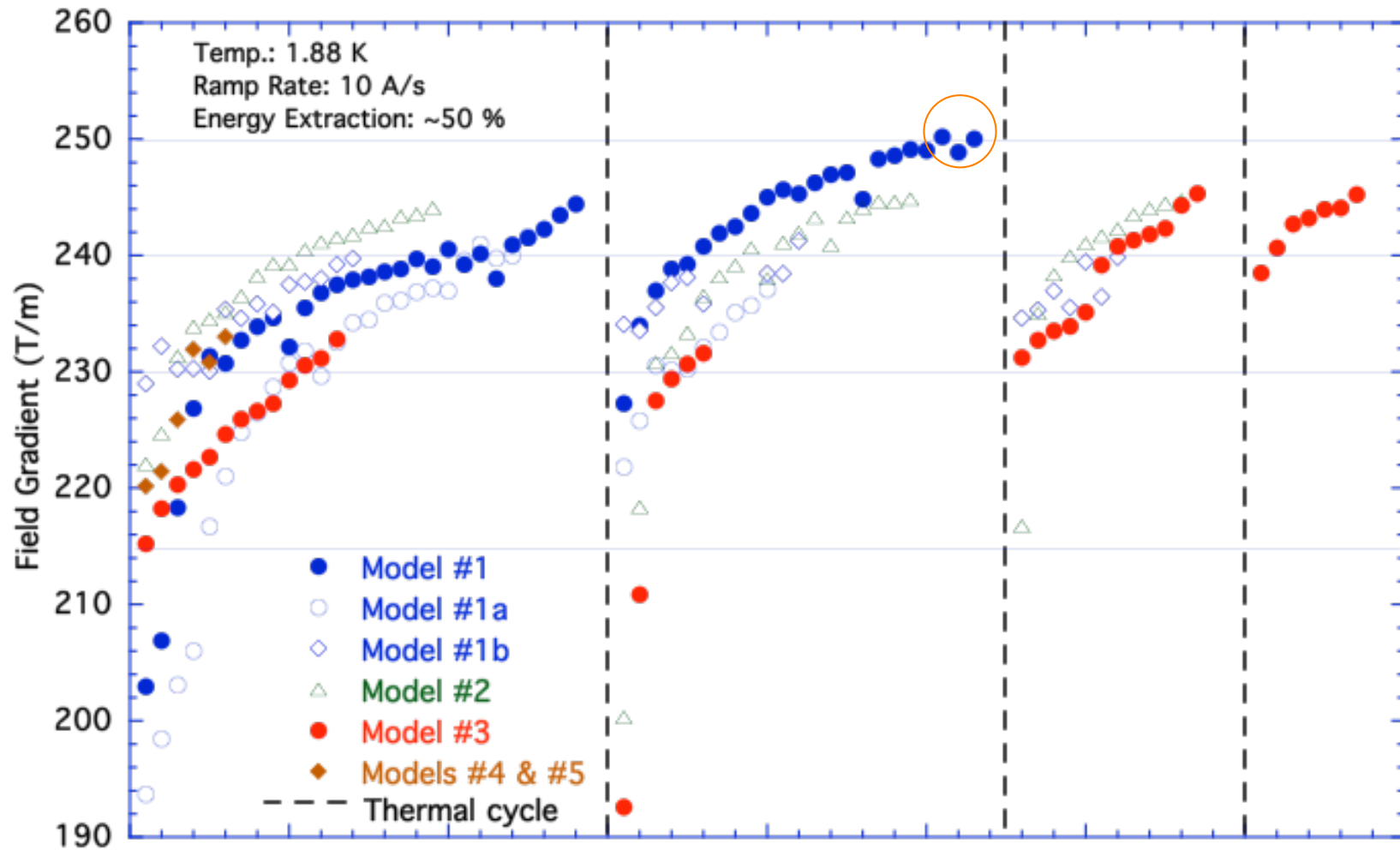


量産メーカーへ技術供与・量産
※構造仕様

KEK内部での
協力体制

- ・超伝導低温工学センター
- ・機械工学センター
- ・加速器研究施設

モデル磁石の試験結果: トレーニングクエンチ



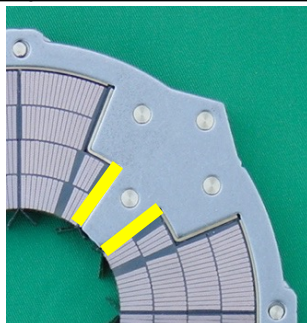
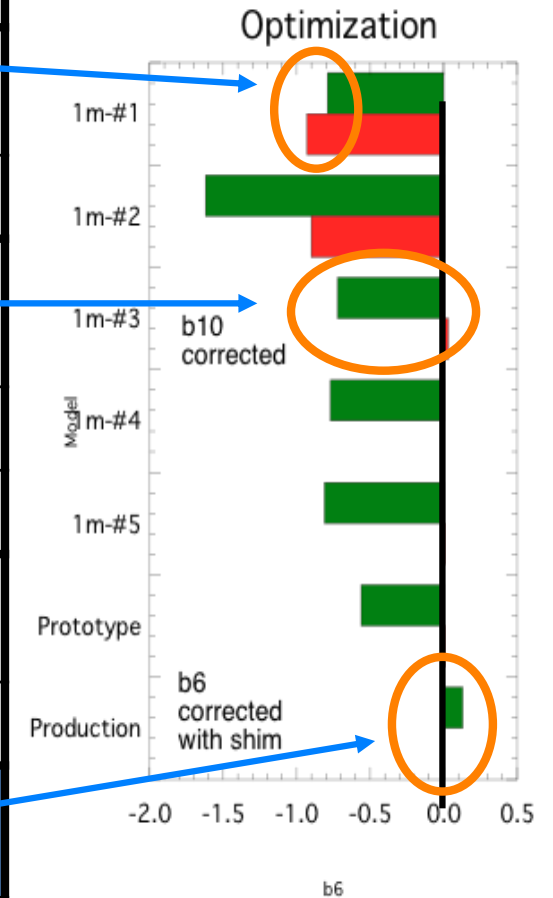
- Reach to 250 T/m for 1st model.
- Exceeding 230 T/m for all models.
- Coil design change for 3rd model and later.
- Training memory after the thermal cycle.

モデル磁石のまとめ

- ・誤差磁場を 10^{-4} まで抑える
 - ・優れたクエンチ性能
- 両立！！



	#	Electromagnetic Design	Notes	b6	b10	
1-m Model	1	Original	Reach 250 T/m	-0.79 (0.32)	-0.93 (-0.98)	KEK
	2	Repeat		-1.62	-0.90	KEK
	3	Re-optimize	b10 Re-optimized	-0.72 (0.15)	0.03 (0.00)	KEK (Toshiba)
	4	Reproducibility		-0.77	0.00	KEK
	5	Reproducibility		-0.81	0.01	Toshiba
Full-scale Proto	1			-0.56	0.01	Toshiba
	2	Repeat				Toshiba
Production	1-19	Shim correction	b6 Re-tuned	0.13	0.00	Toshiba



Achievement

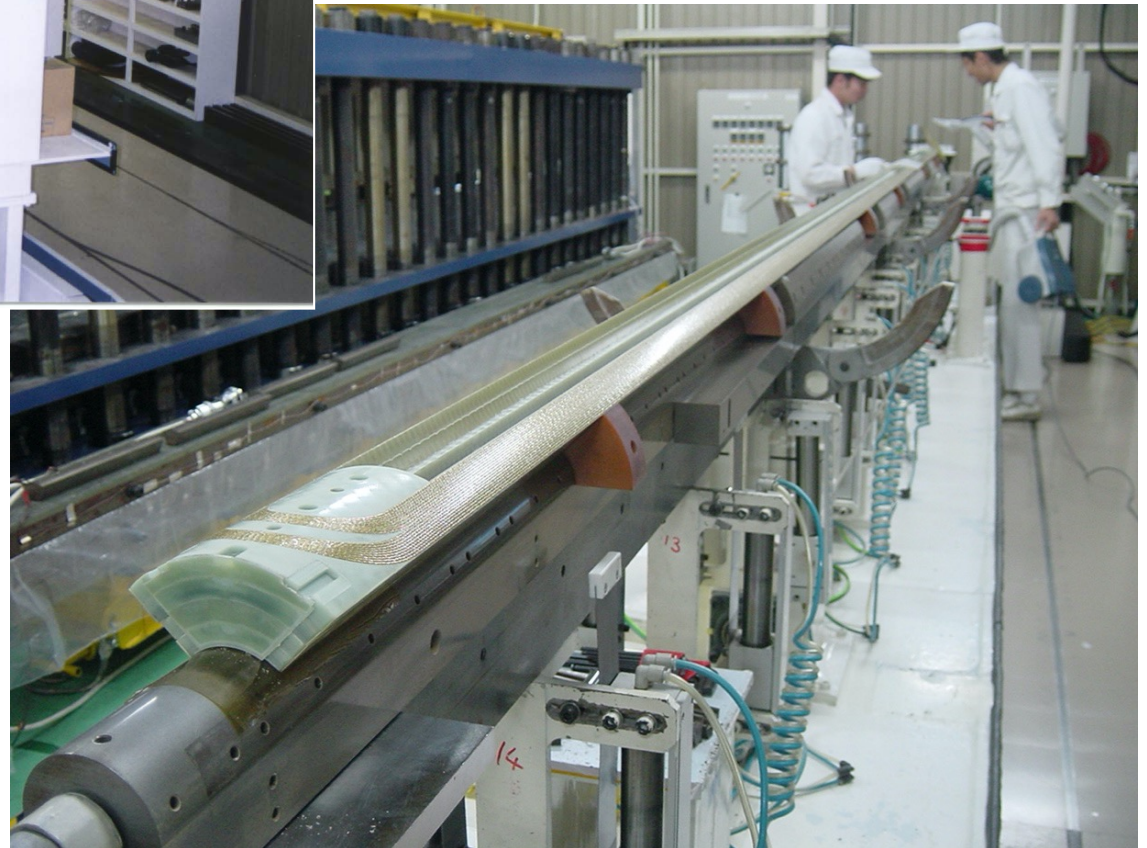
1-m model reached: **250 T/m**

Full-scale prototypes: **Multiple tuned $\ll 10^{-4}$**

MQXA量産機： コイル巻き

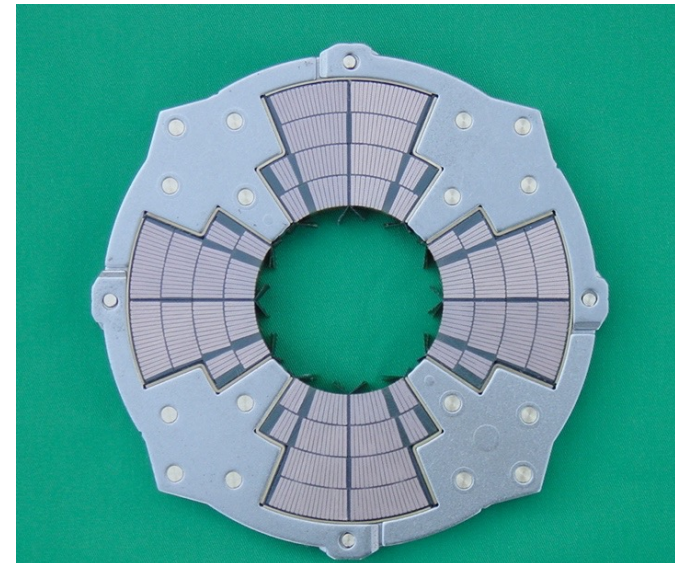
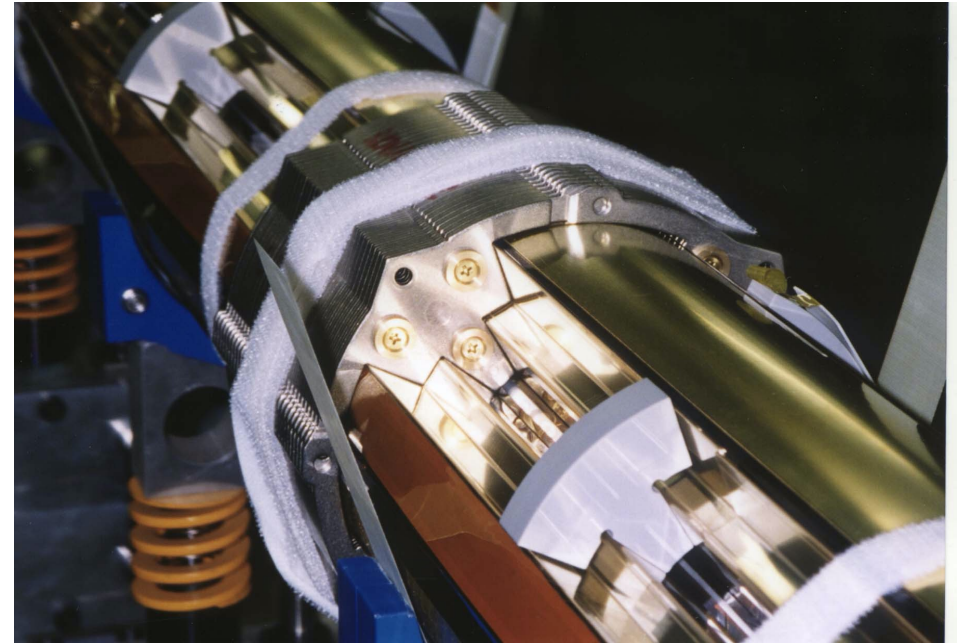


”構造仕様”による製造



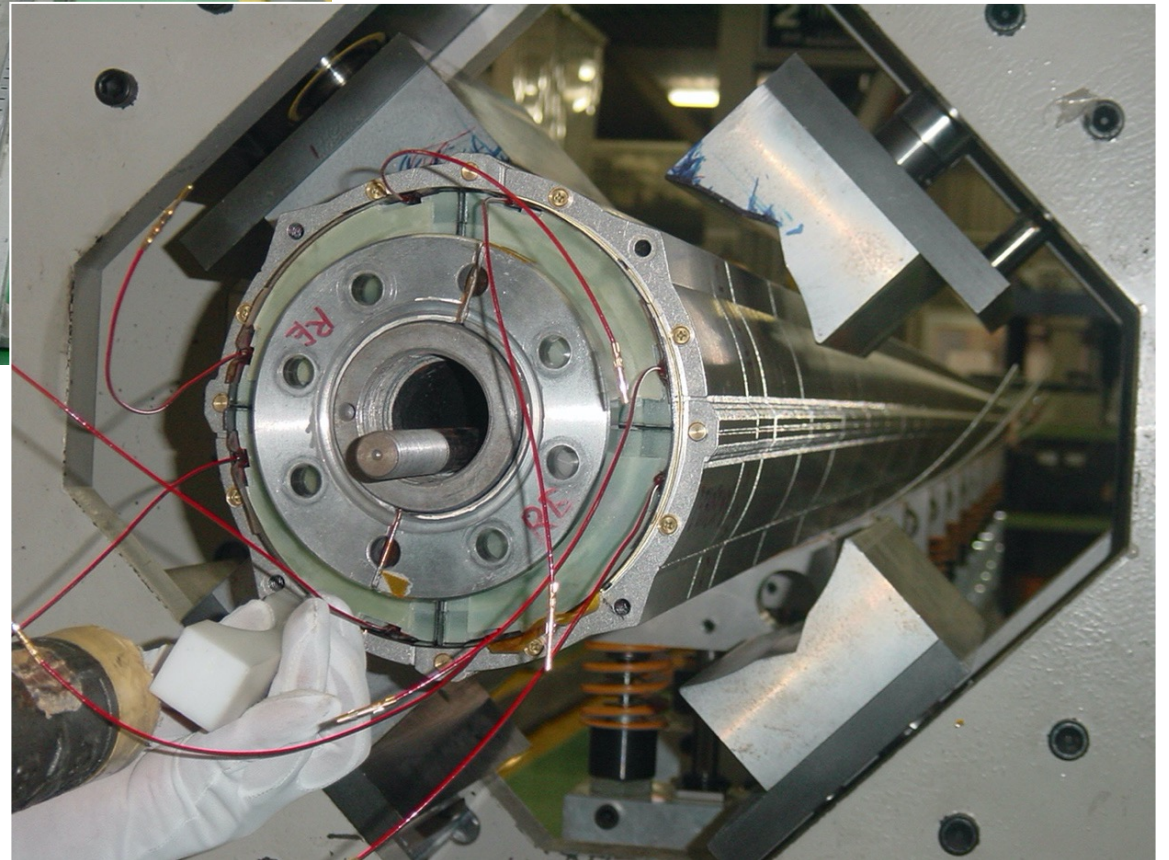
Courtesy of TOSHIBA

MQXA量産機： カラーリング



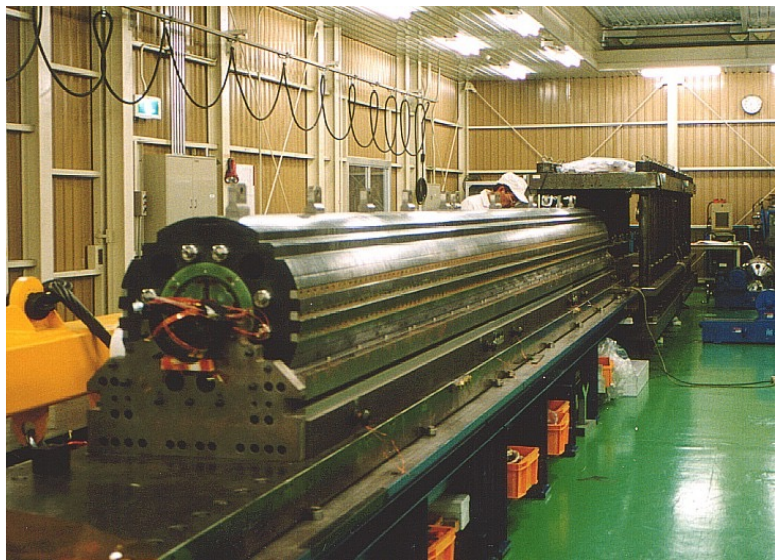
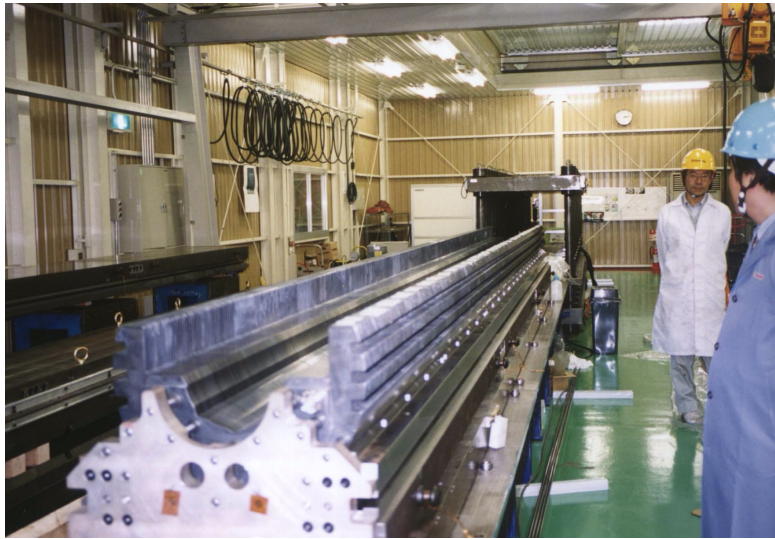
Courtesy of TOSHIBA

MQXA量産機： カラーリング



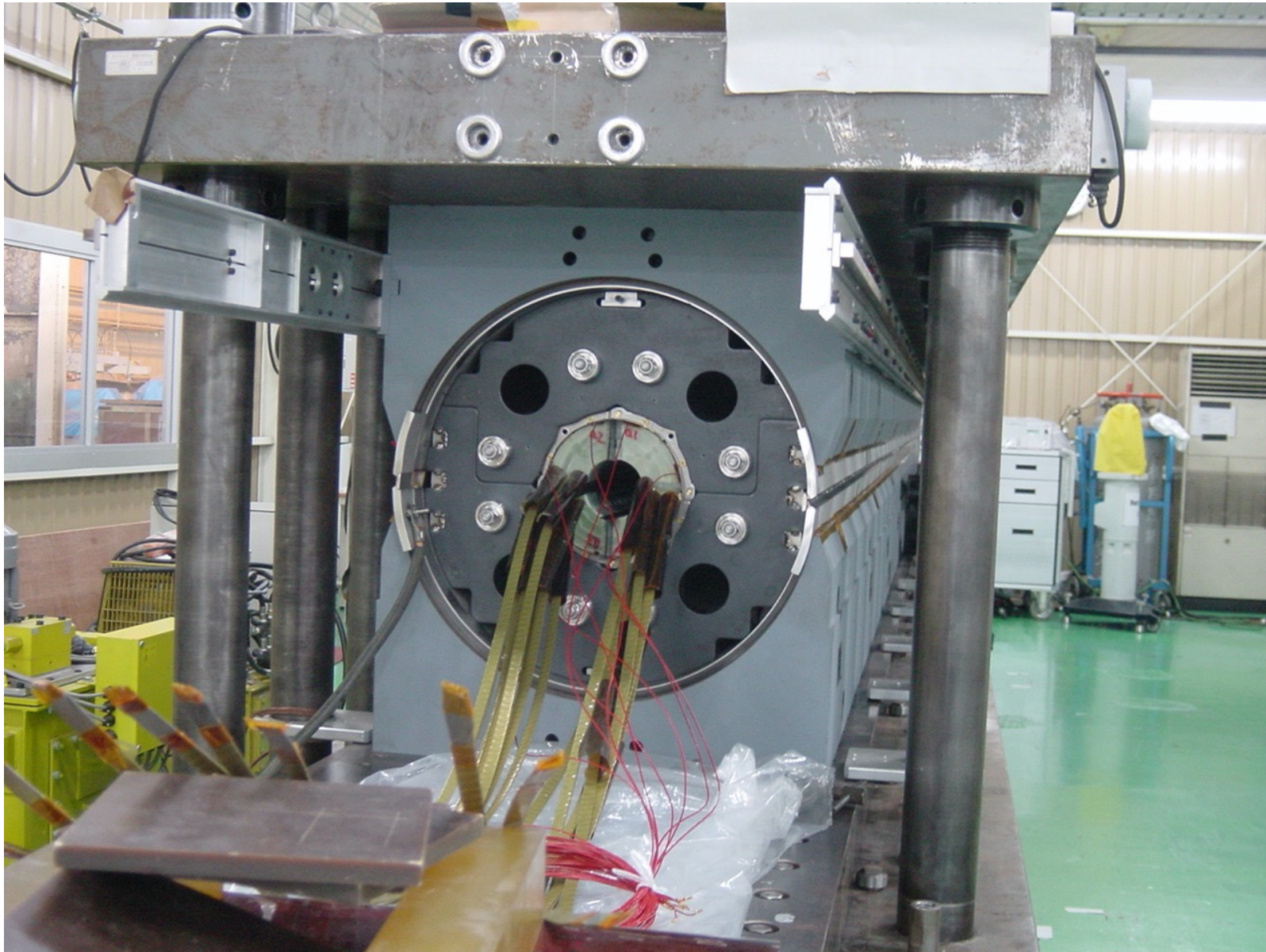
Courtesy of TOSHIBA

MQXA量産機： ヨーキング



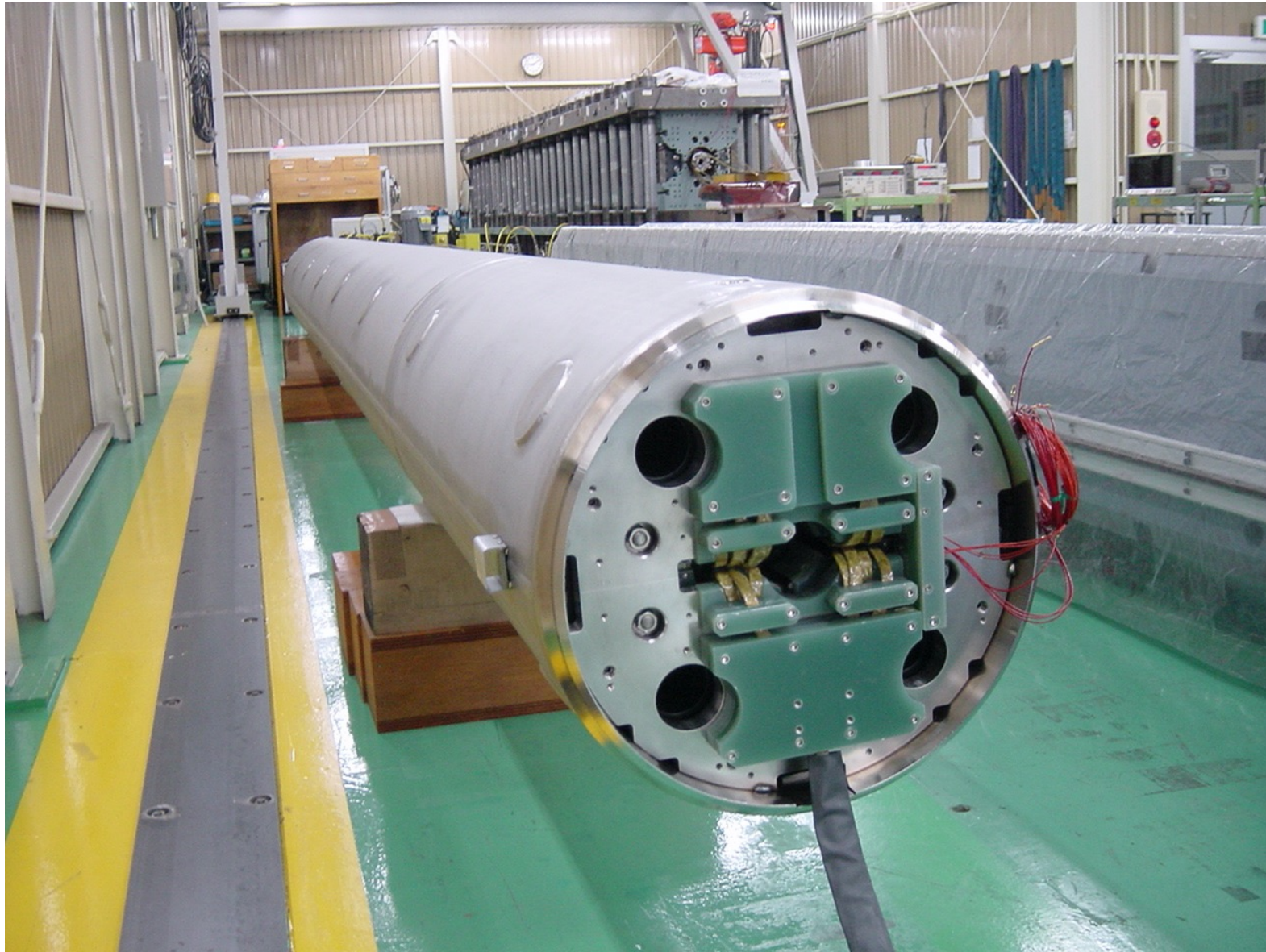
Courtesy of TOSHIBA

MQXA量産機： シェル溶接



Courtesy of TOSHIBA

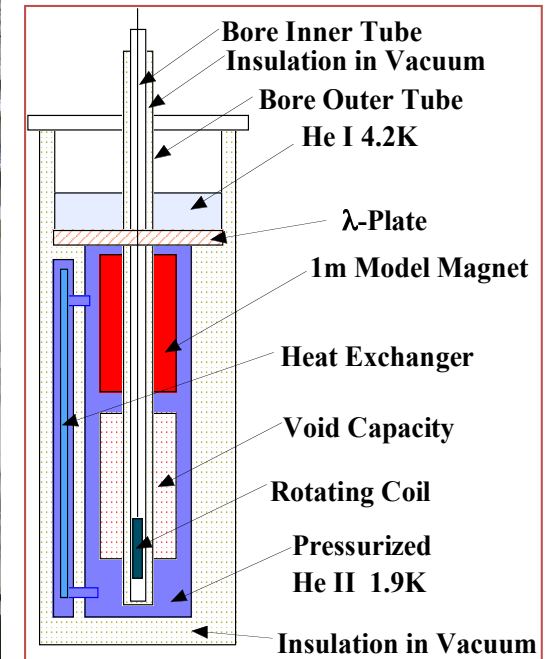
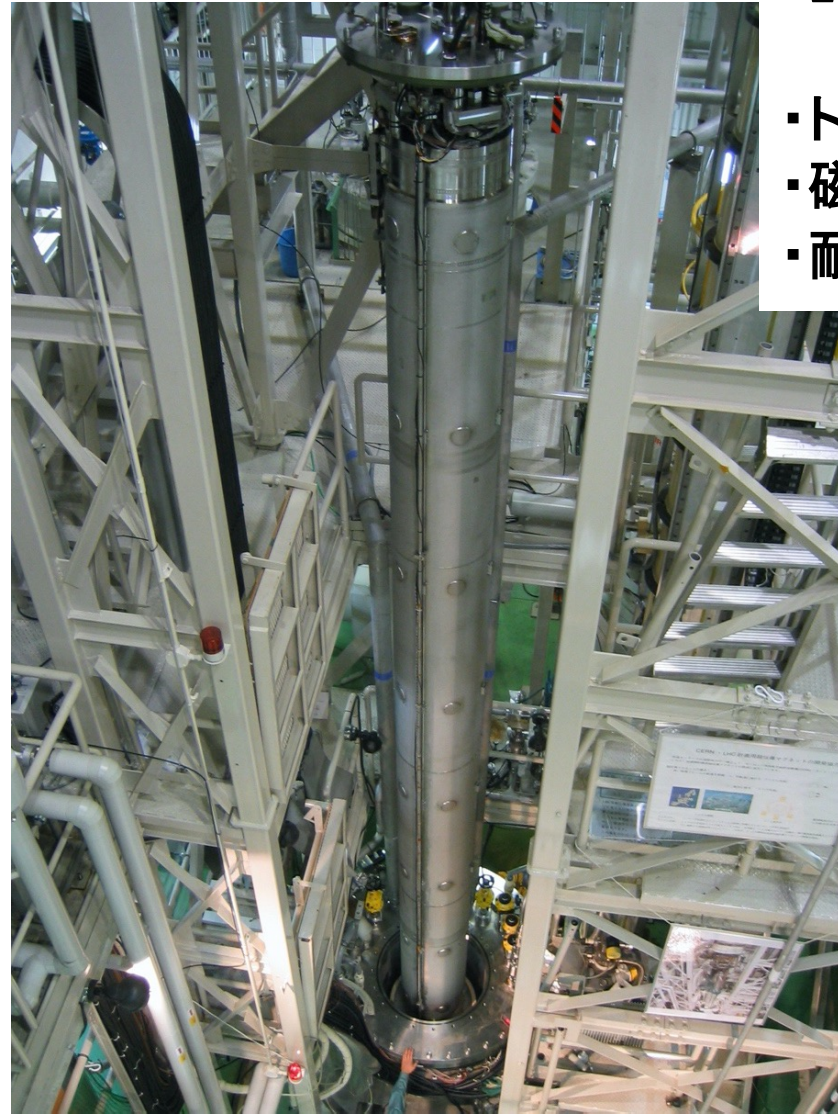
MQXA量産機：磁石の完成



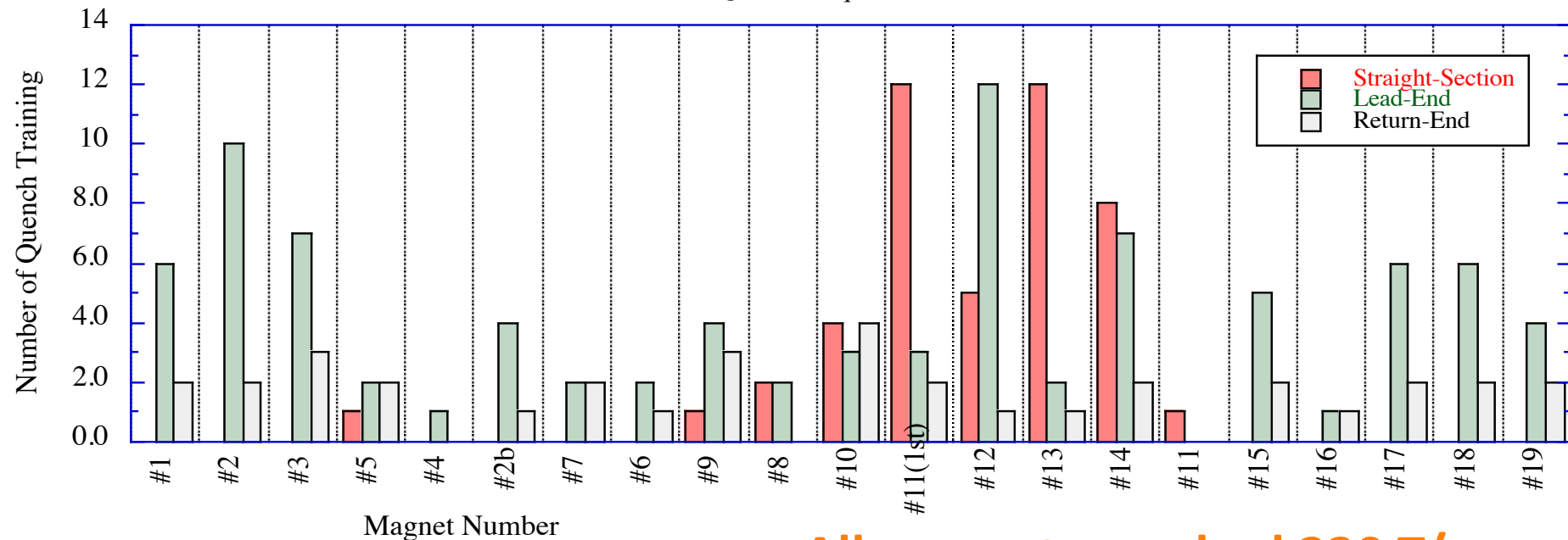
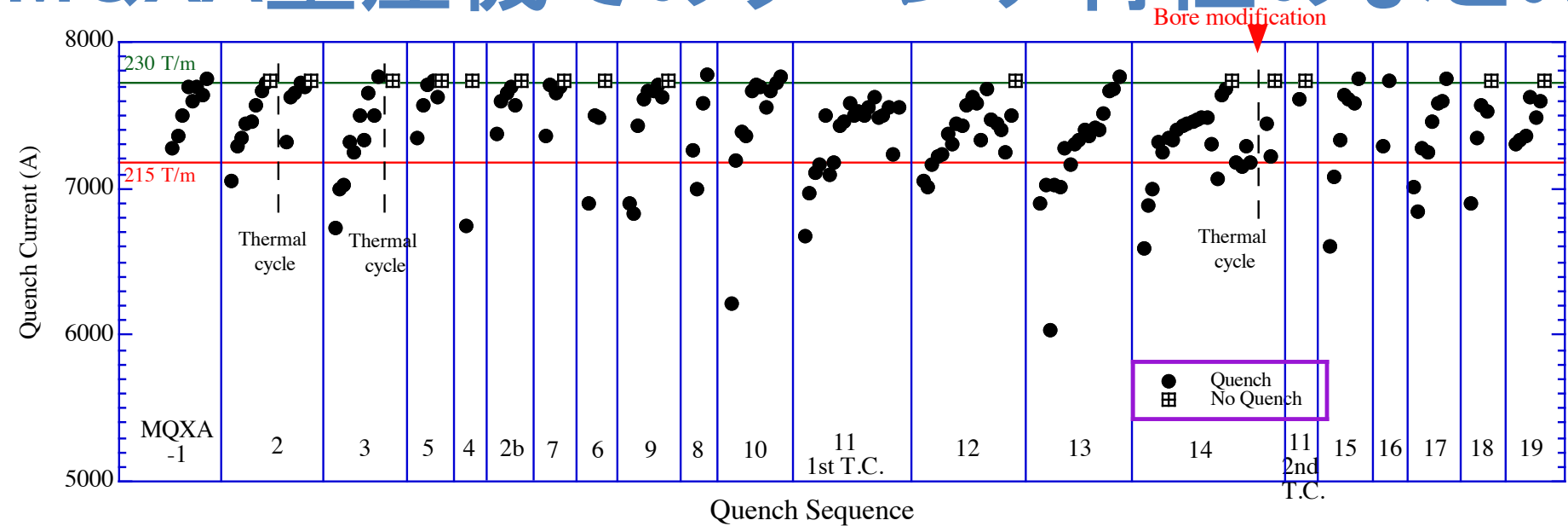
Courtesy of TOSHIBA

MQXA量産機： 冷却励磁試験

- ・1.9K超流動ヘリウム冷却試験
- ・トレーニングクエンチ
- ・磁場測定
- ・耐電圧試験



MQXA量産機でのクエンチ特性のまとめ



All magnets reached 230 T/m.

MQXA量産機：磁場勾配、磁場長

19 units of MQXA

Current (A)	Field Gradient (T/m)		Magnetic Length (m)	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
392.3	12.445	0.0096	6.3632	0.0048
2011.3	63.475	0.0200	6.3642	0.0010
3207.9	101.01	0.0341	6.3642	0.0009
6134.4	186.53	0.0581	6.3670	0.0009
6677.3	201.73	0.0587	6.3675	0.0010
7227.9	217.07	0.0651	6.3679	0.0012

再現性の高さ(10^{-4} 程度) = 部品や組み立ての精密さ

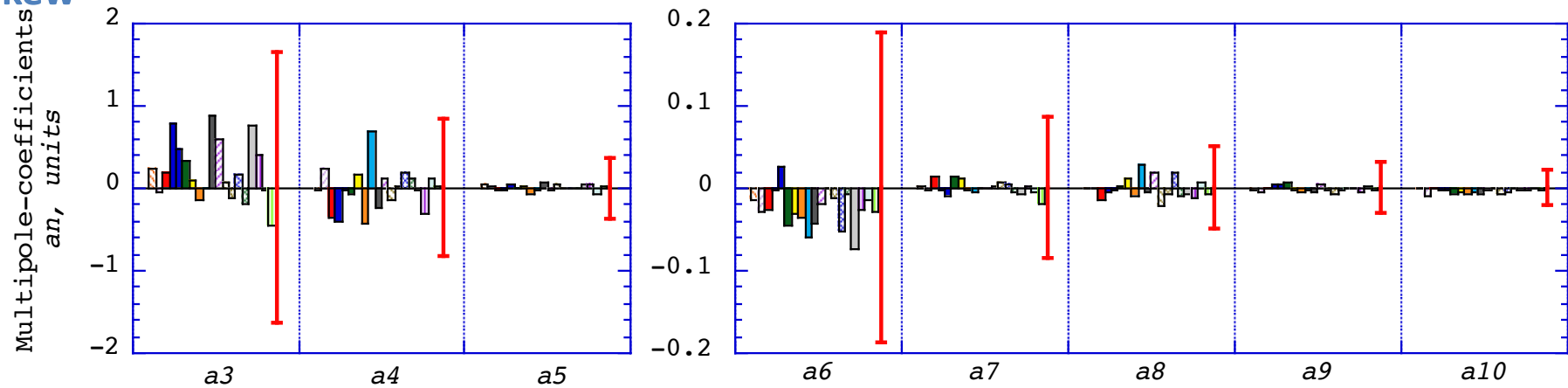
MQXA量産機： 誤差磁場（多極成分）

@216T/m

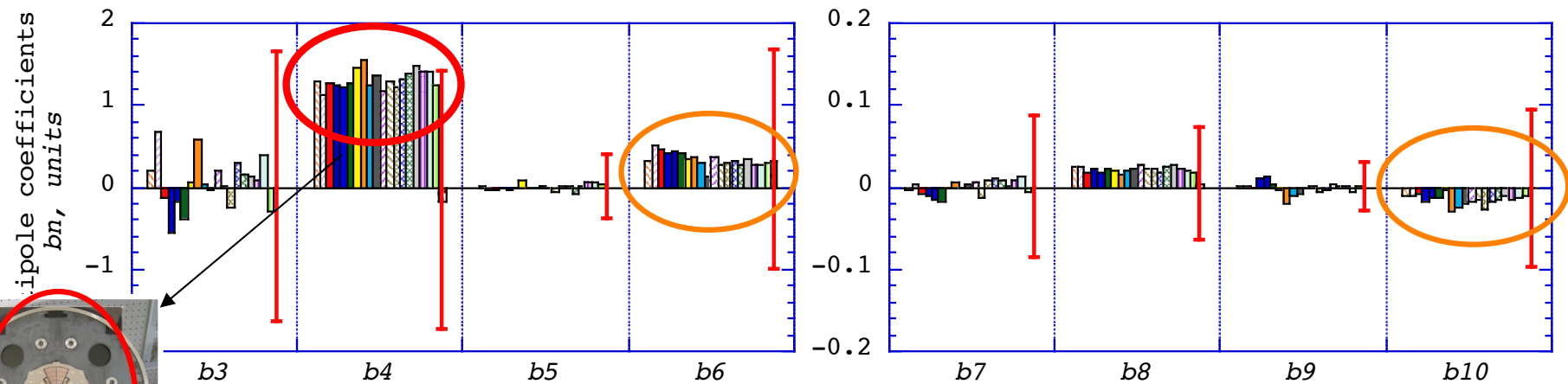
$$B_y + iB_x = 10^{-4} B_2 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1}$$

units : $10000 \times \frac{A_n, B_n}{\text{Quadrupole } (B_2)}$

Skew



Normal



楕円変形に起因

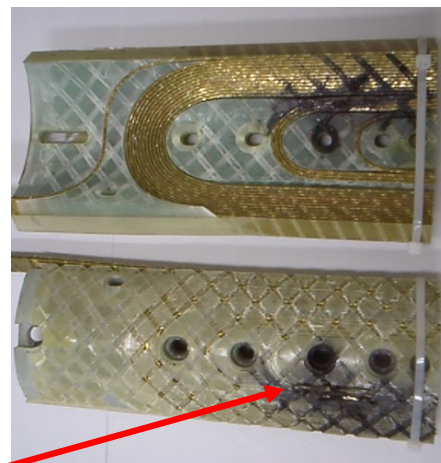
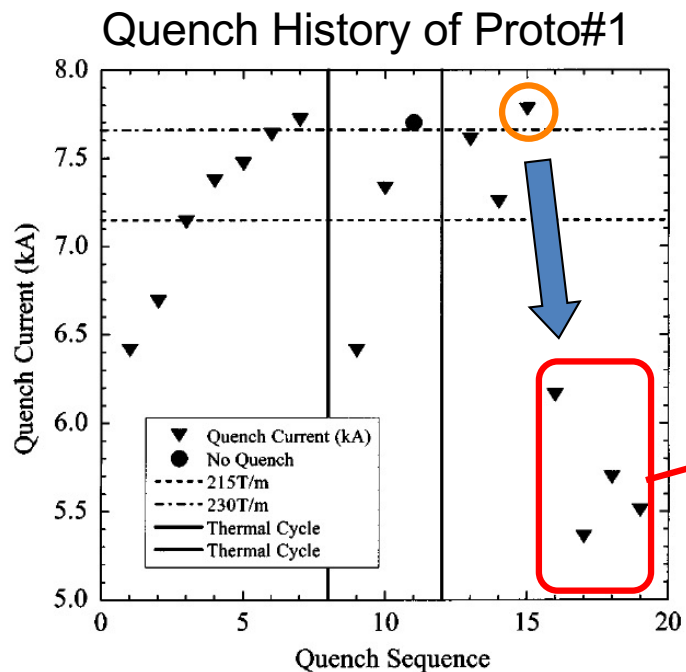
- ノーマル8極成分のみ大きい
- 要求よりも充分小さい
- コイル形状の標準偏差は20 μ m以下を達成



LHCが設計以上の性能を発揮する一因

トラブル1: ターンショート

Turn short at 1st turn of 2nd layer: Proto #2

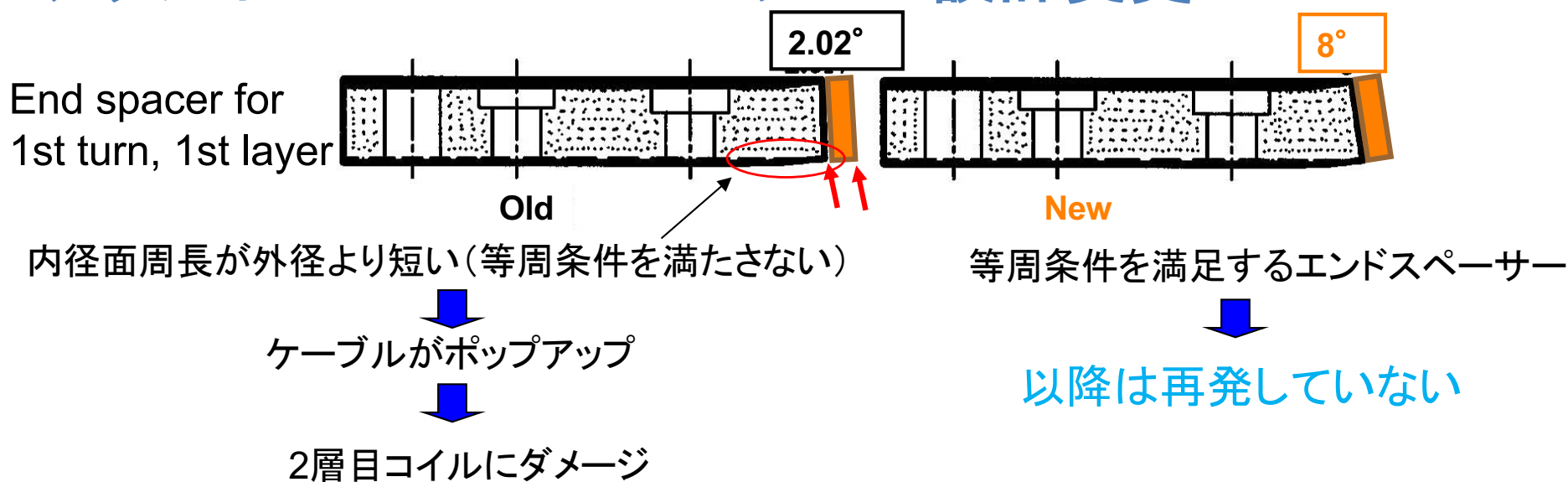


Turn & layer short of Proto #1



同じ問題？

アクション: エンドスペーサーの設計変更

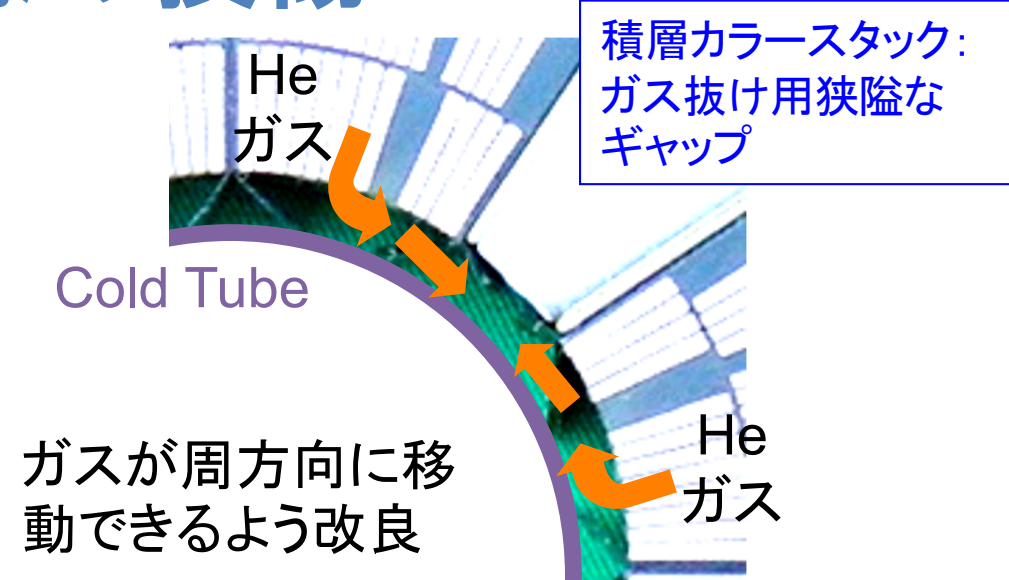


トラブル2: 対地電気絶縁の損傷



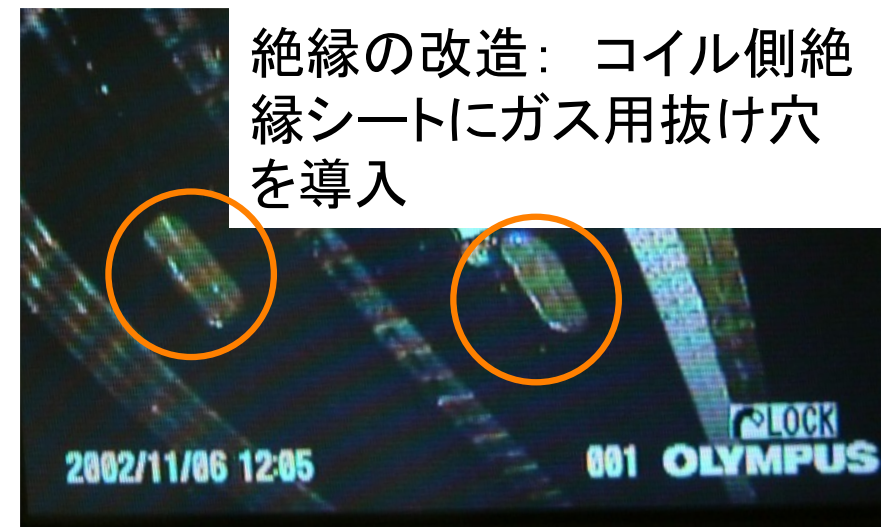
クエンチの際、ガスが絶縁フラップで封じられ、圧力上昇 → 損傷

冷却試験後のMQXA02のボア内の様子



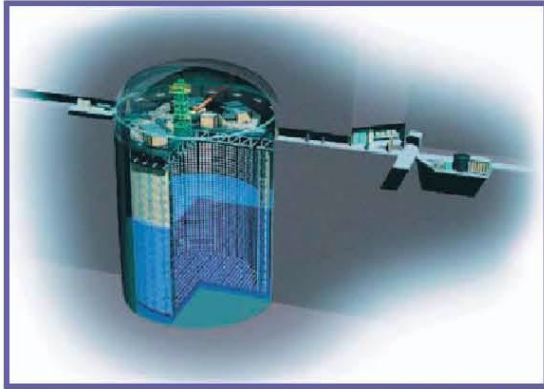
アクション: 対地絶縁にガス用抜け穴を導入

- 縁面距離、耐電圧試験の仕様を考慮。
- 全ての磁石は耐電圧試験に合格。
- 適用以降、問題再発はない。

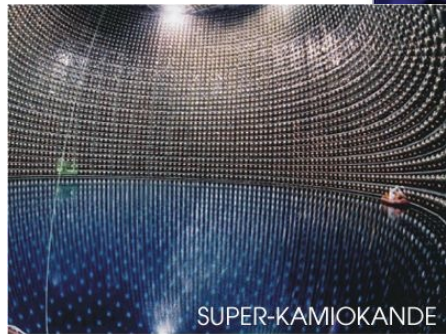


J-PARCニュートリノビームライン磁石： SCFM

Tokai-to-Kamioka (T2K) Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

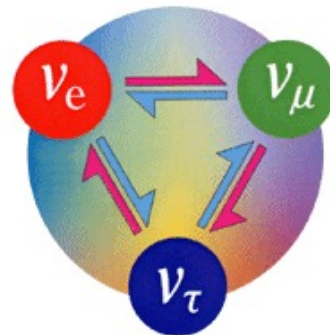
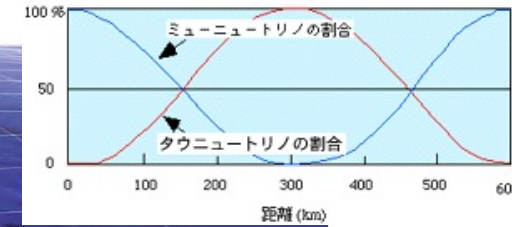


SUPER-KAMIOKANDE
5万トン水チェレンコフニュートリノ観測装置
スーパーカミオカンデ



295km

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



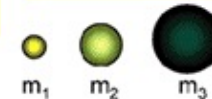
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

フレーバーの固有状態

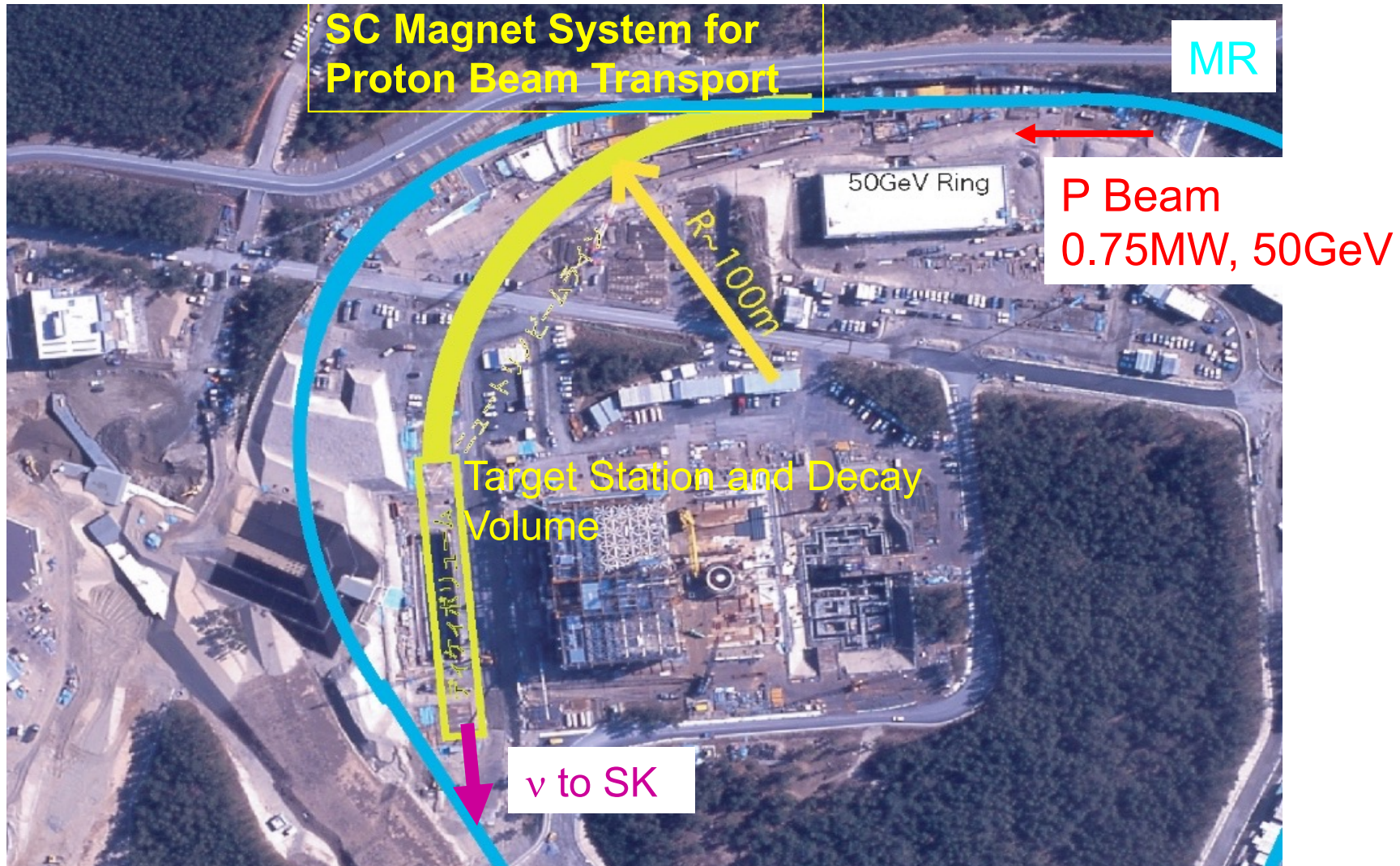


3つの独立な混在角パラメーターと
CPの破れを生む1つの位相角

質量の固有状態



J-PARC and Neutrino Beam Line for T2K exp.

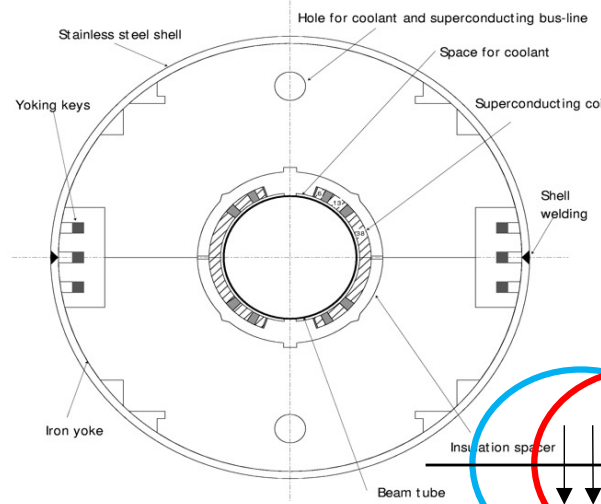


- 『建設費削減』、『開発・建設期間の短縮』の強い要請
Original optics based on FODO lattice
vs.
New optics with "Combined Function" magnets

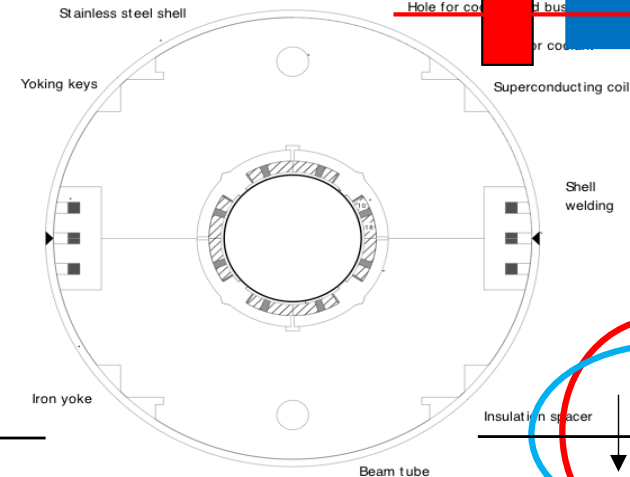
Sc Combined Function Magnet, SCFM

第1案

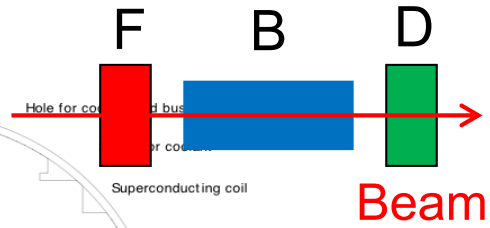
- BNL-RHICタイプの二極、四極超伝導磁石
- 20 Dipole
- 20 Quadrupole
- >> 40 magnets
- >> 120 coils
- 2種類の製造ライン



RHIC like Dipole

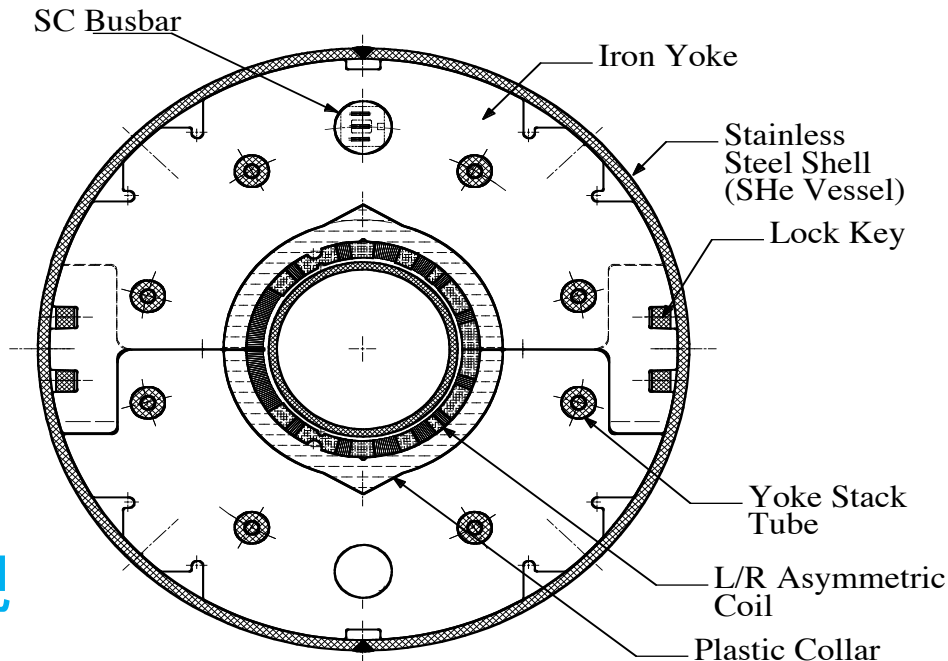


RHIC like Quadrupole

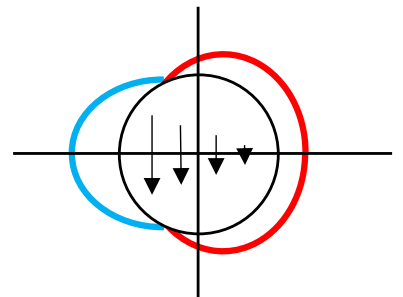
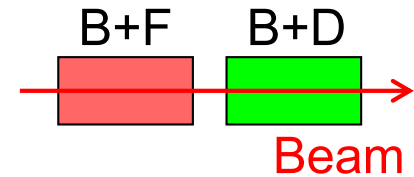


第2案

- 機能結合(複合磁場)型超伝導磁石: SCFM
- 28 magnets, 56 coils
- 1種類の製造ライン

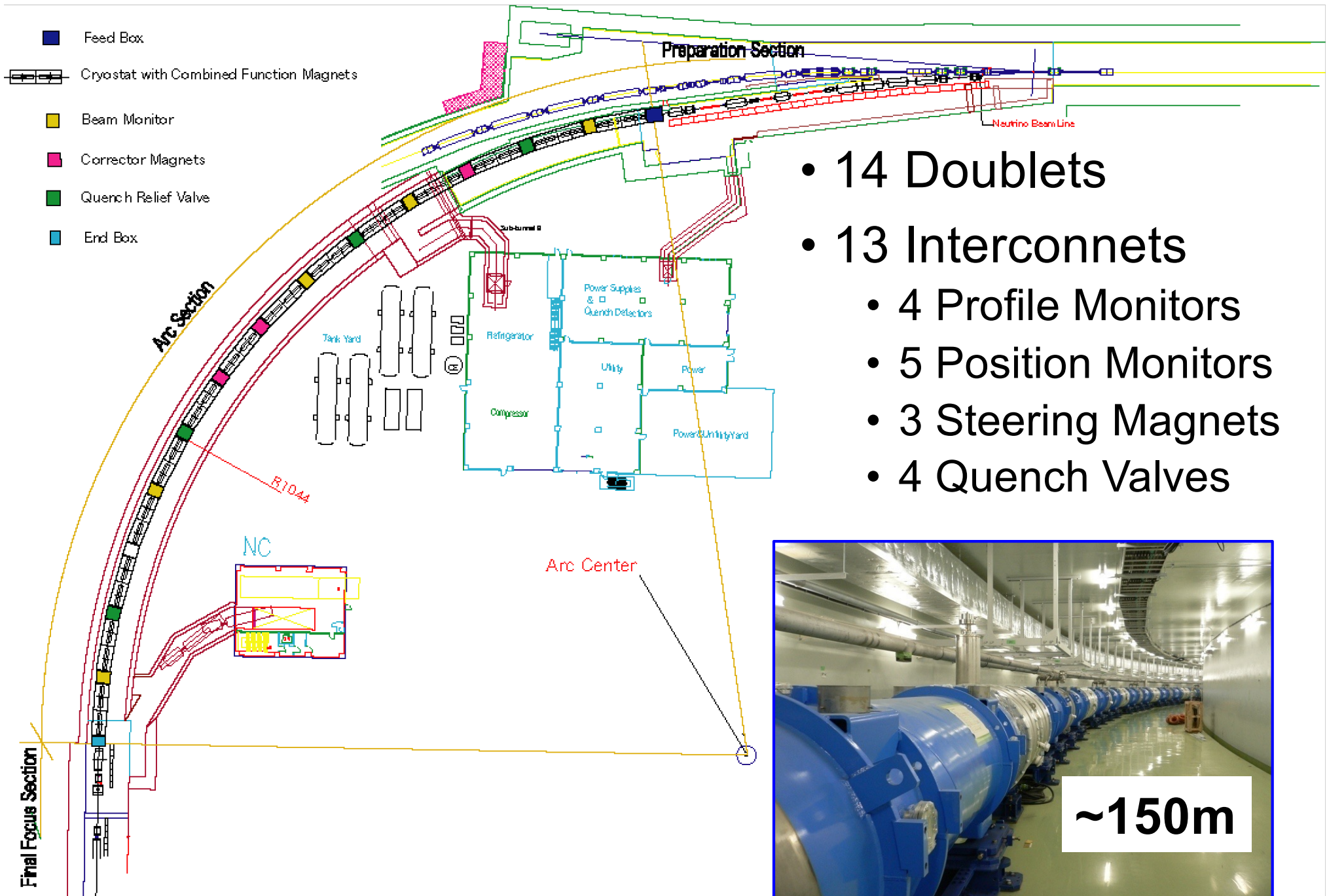


SC Combined Function Magnet



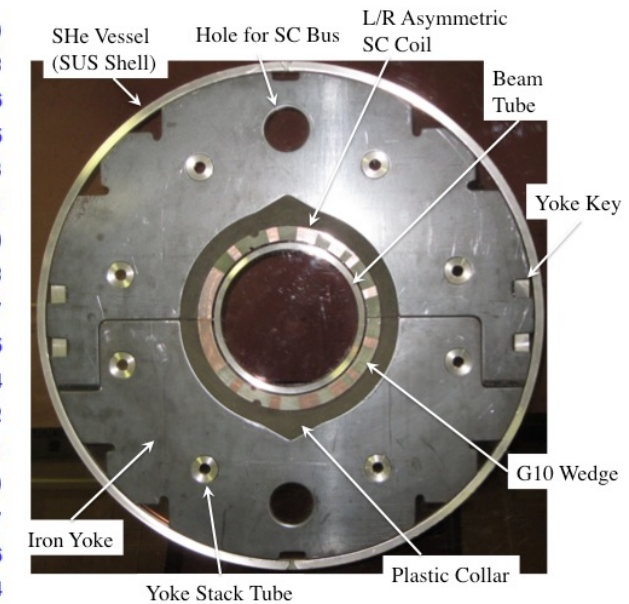
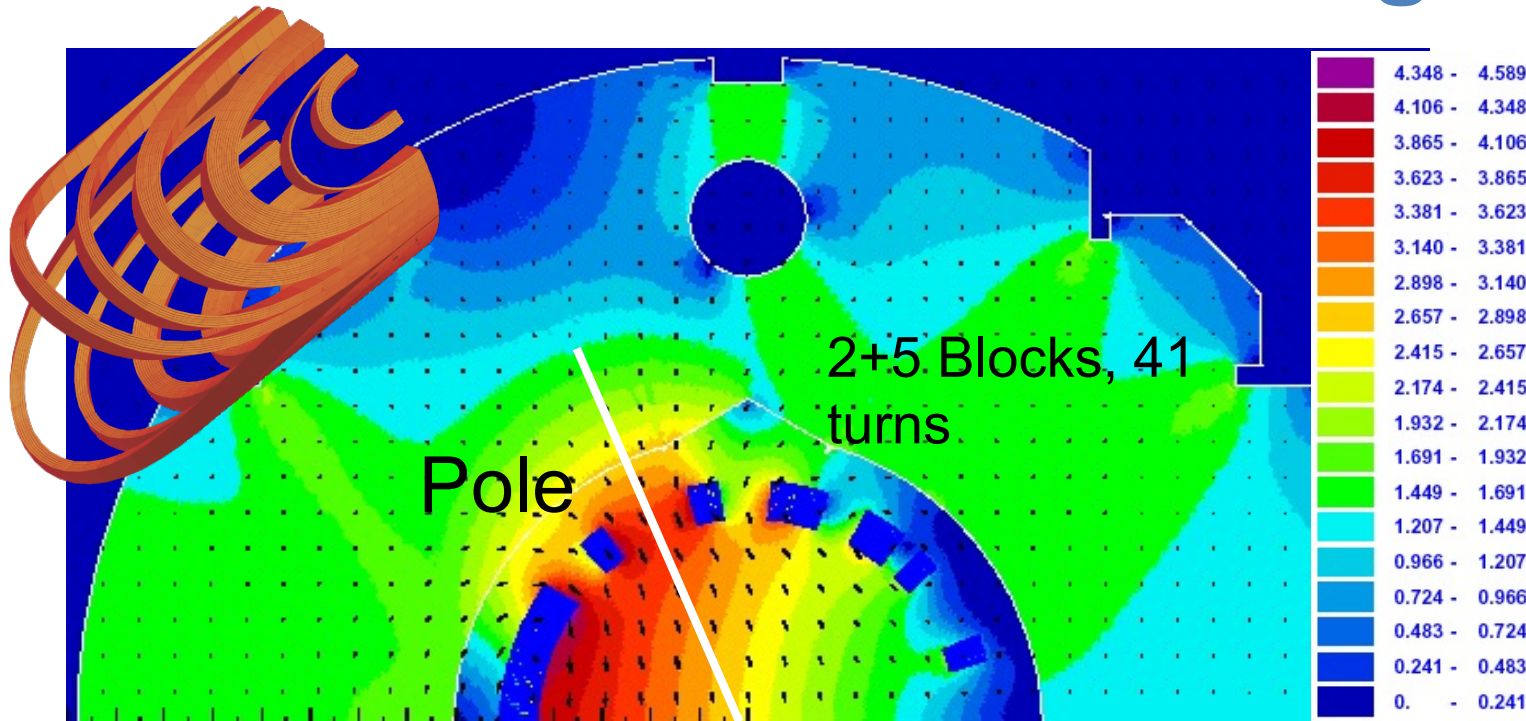
コスト削減と工期短縮を実現

Neutrino Beam Line with SCFM



- 14 Doublets
- 13 Interconnets
 - 4 Profile Monitors
 - 5 Position Monitors
 - 3 Steering Magnets
 - 4 Quench Valves

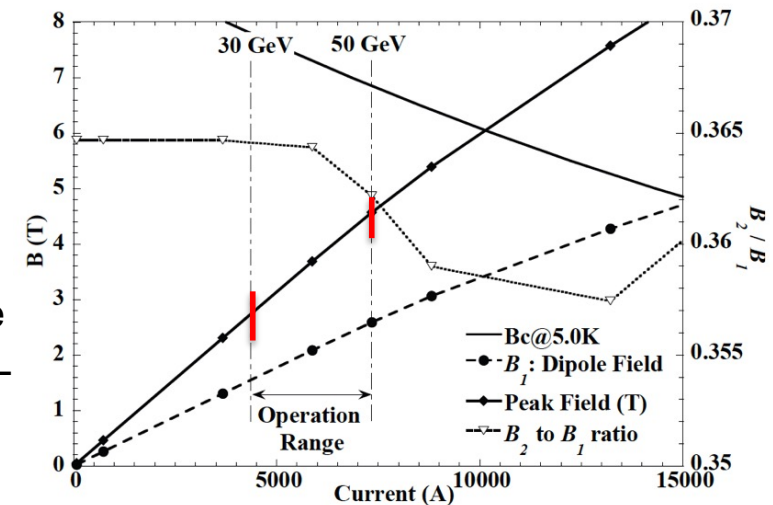
SC Combined Function Magnet



Spec. for 50 GeV proton beam

Coil ID.:	173.4mm	Op. Current:	7345 A
Mag. Length:	3300 mm	Op. Margin:	72%
Mech. Length:	3630 mm	Inductance:	14.3 mH
Tmax:	< 5.0K	Stored Energy:	386 kJ
(Supercritical Helium Cooling)		# of Magnet:	28
Dipole Field:	2.59 T	SC Cable:	NbTi/Cu
Quad. Field:	18.6 T/m		Rutherford Type Cable
Field Error:	< 10 ⁻³ @ 50mm		for LHC Dipole Outer-L

- コイル内ピーク磁場： 4.6 T at 50 GeV.
- "1パス"のビームライン用磁石であるため、磁場精度は10⁻³ 程度。
- 30GeV運転では、負荷率50%以下。



ロードラインカーブとB1/B2比の電流依存性

磁石開発

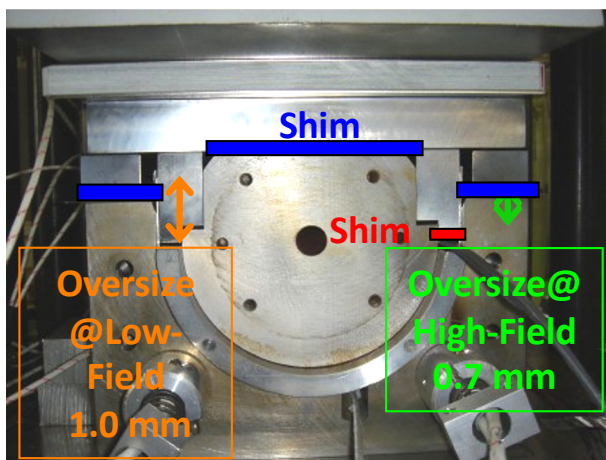
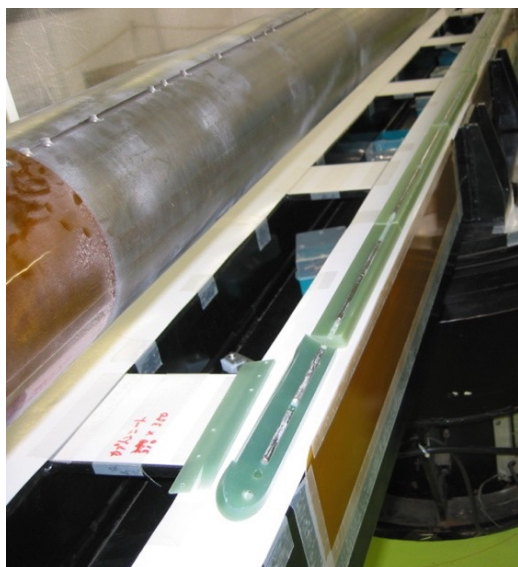
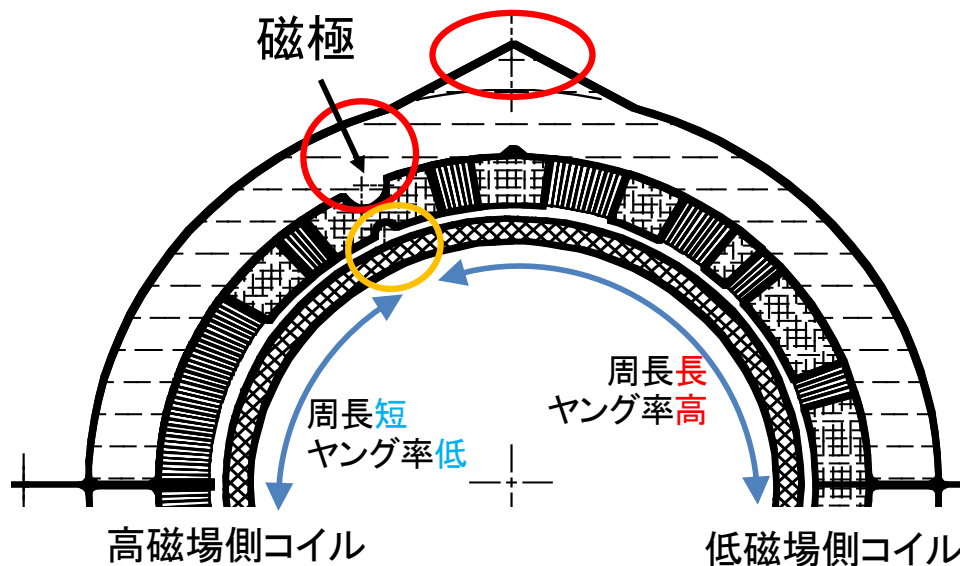
BNL RHIC磁石を参考

<方針>

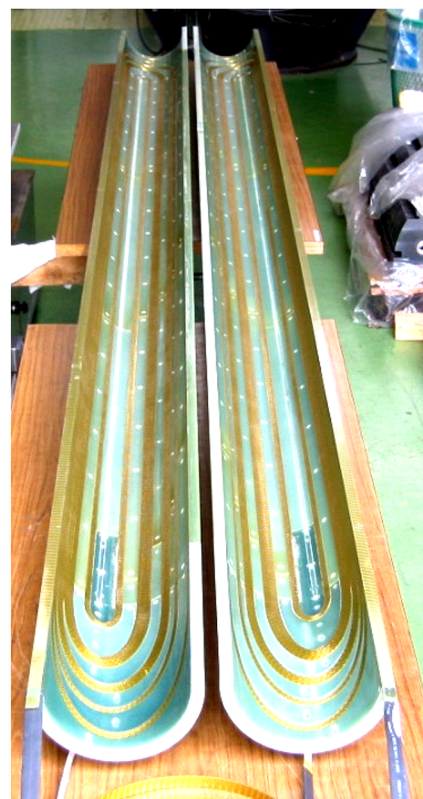
- 予備応力、機械支持：鉄ヨークをキー止め
- 左右非対称コイル
- プラスチックカラー(フェノール樹脂)の採用。対地絶縁用ポリイミドは使用しない。

<設計>

- **ピンにより巻線マンドレルに位置決め**
- **プラスチックカラーにより、鉄ヨークに対するコイルの位置決め(三角ノッチ、ピン形状)**
 - ヤング率、周長の違い
 - 非対称コイルサイズ制御



巻線マンドレルとピンで位置決め



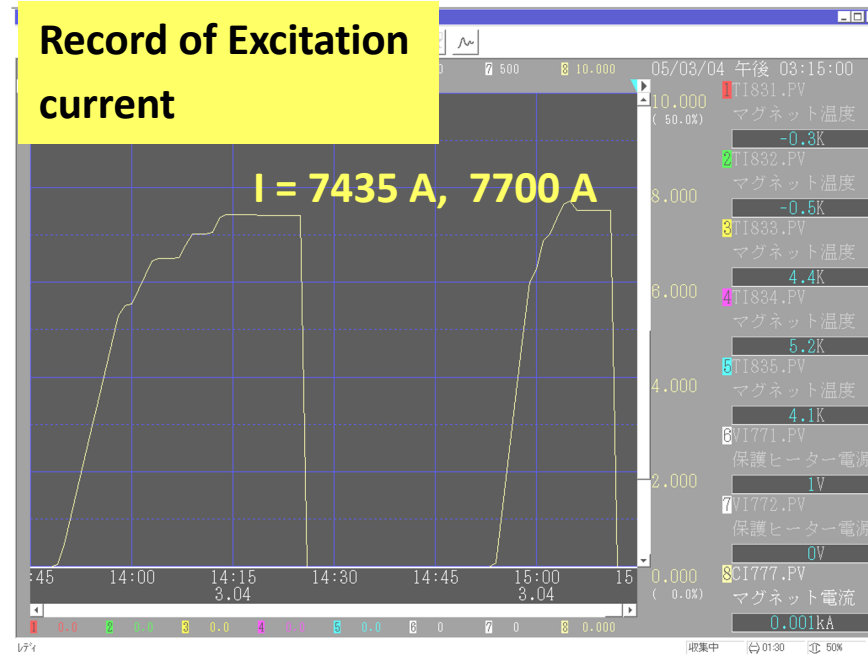
鏡対称となる上下コイル



プラスチックカラー
ガラス繊維強化フェノール
プラスチック(モールディング
成形)

Test Results

$I_{op} = 7345 \text{ A}$ @ 50 GeV (and $I_{max} = 7,700 \text{ A}$) reached with no quench.



Field quality meets optics requirements.
No feedback to the design for series production.

	Measurement	Computation
Current (A)	7460	7345
B_1 (T·m)	8.906	8.712
B_2 (T·m)	3.127	3.120
B_3 (T·m)	$-220.6 \cdot 10^{-4}$	$-293.6 \cdot 10^{-4}$
B_4 (T·m)	$-5.9 \cdot 10^{-4}$	$-20.1 \cdot 10^{-4}$
B_5 (T·m)	$-51.9 \cdot 10^{-4}$	$-30.6 \cdot 10^{-4}$
B_6 (T·m)	$-75.2 \cdot 10^{-4}$	$-62.8 \cdot 10^{-4}$
B_7 (T·m)	$-44.6 \cdot 10^{-4}$	$-20.9 \cdot 10^{-4}$
B_8 (T·m)	$-74.5 \cdot 10^{-4}$	$-32.0 \cdot 10^{-4}$
B_9 (T·m)	$-79.9 \cdot 10^{-4}$	$-73.4 \cdot 10^{-4}$
B_{10} (T·m)	$-13.8 \cdot 10^{-4}$	$-0.3 \cdot 10^{-4}$

- Fast ramping up to 7345A: No quench at 1000 A/s (P/S limit).
- No training quench at the 2nd cold test after thermal cycle.



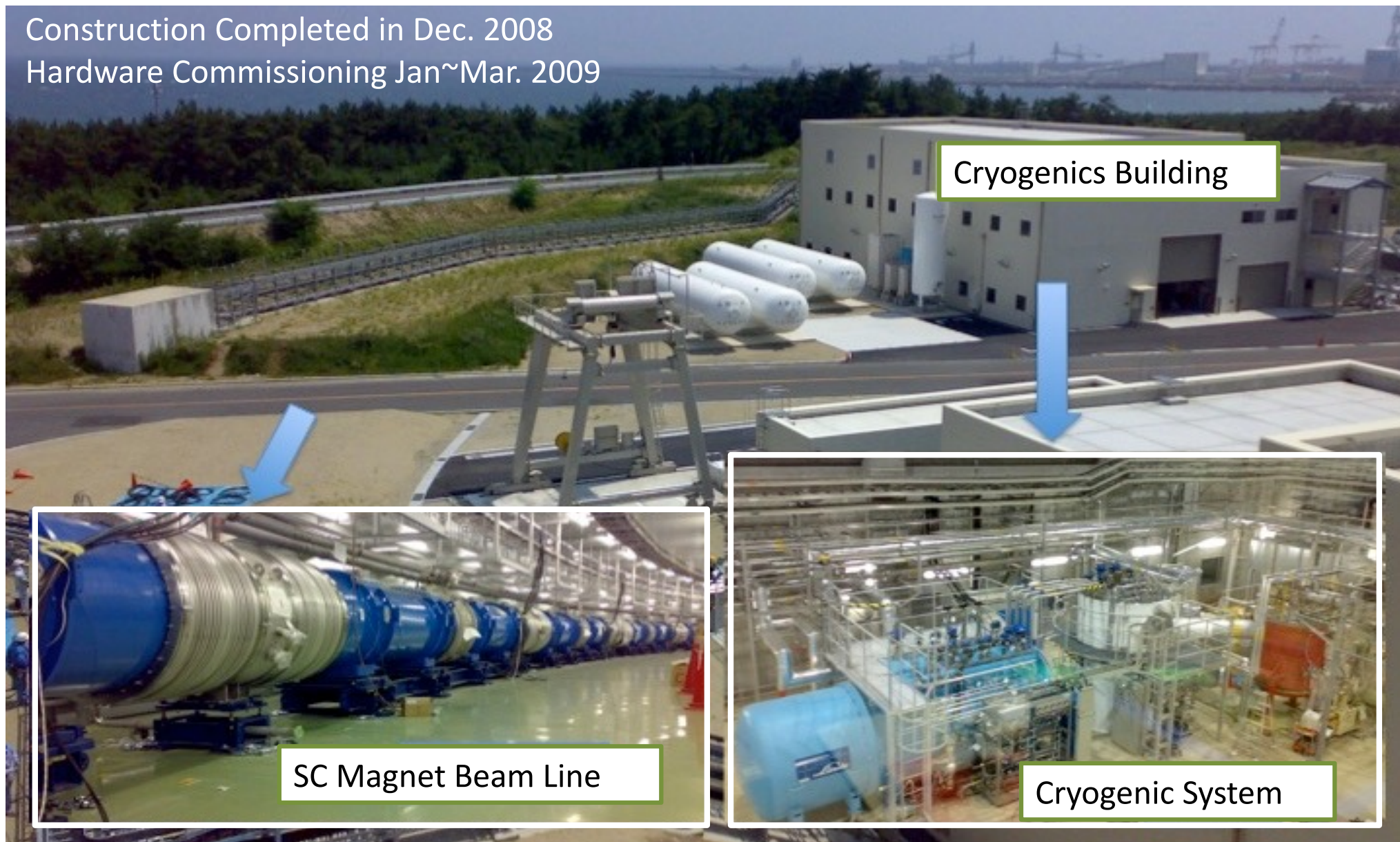
- 32台の実機磁石を製造、試験。
- 7700 Aまでクエンチなしで到達
- 仕様を満足する磁場性能。高い再現性。

J-PARC Neutrino Beam Line

- 28台のSCFM磁石をニュートリノビームラインに設置。
- これまで安定したビーム運転

Construction Completed in Dec. 2008

Hardware Commissioning Jan~Mar. 2009



Cryogenics Building

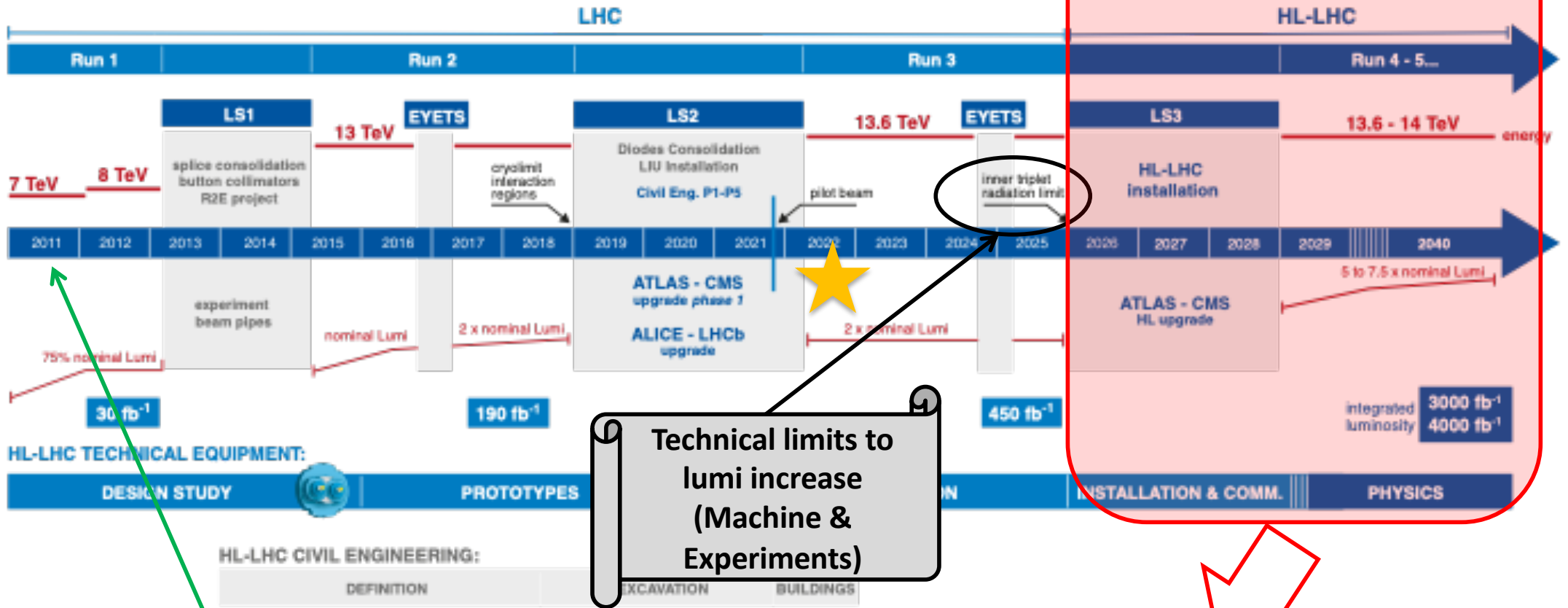
SC Magnet Beam Line

Cryogenic System

HL-LHCビーム分離用大口径双極磁石： MBXF



LHC / HL-LHC Plan



Technical limits to lumi increase (Machine & Experiments)

HL-LHC Design Study (FP7-HiLumi) started in 2011.

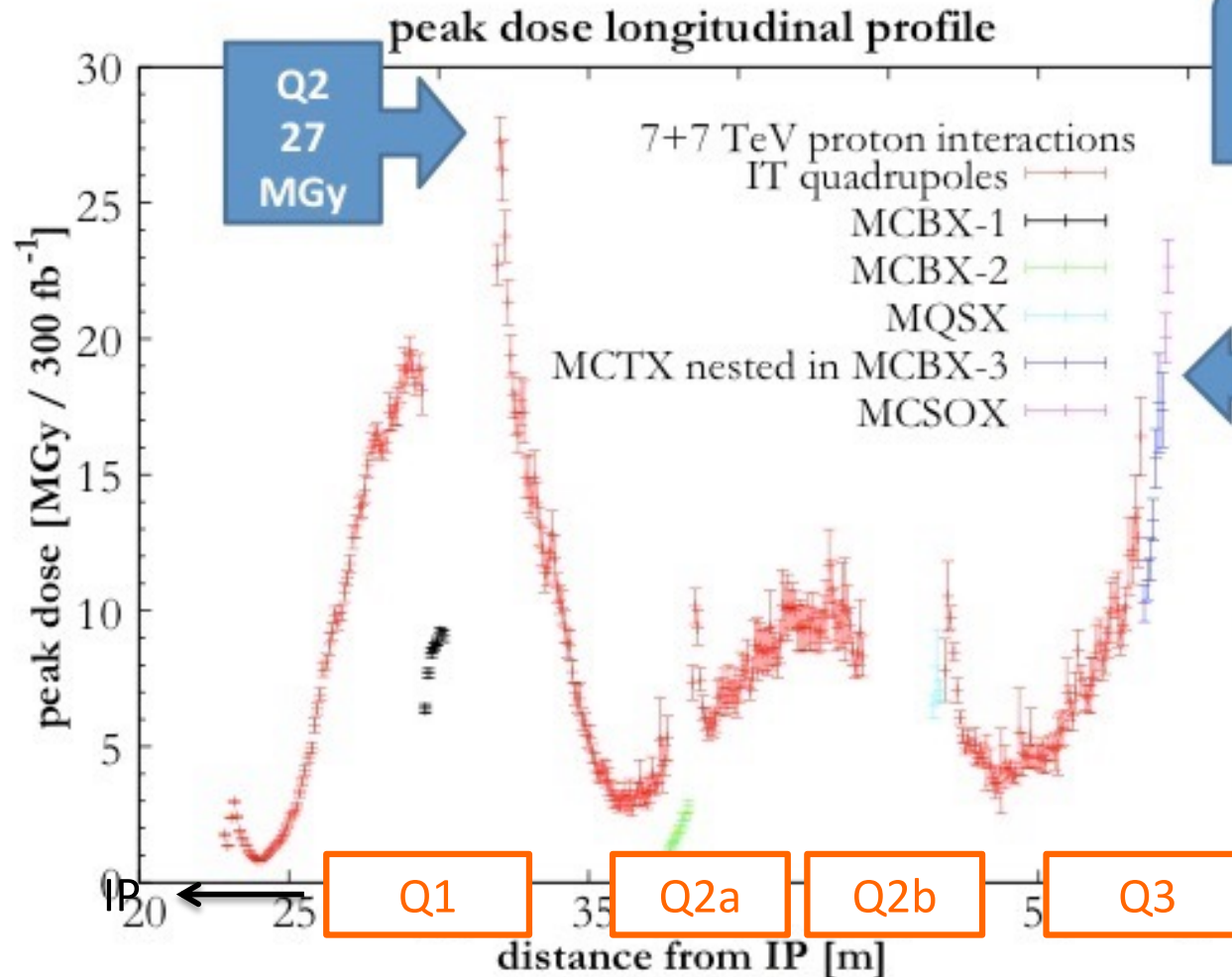
HL-LHC: High Luminosity LHC
 Target: 3000 fb⁻¹, 5x10³⁴ cm⁻² sec⁻¹
 (Nominal LHC: 300 fb⁻¹, 1x10³⁴ cm⁻² sec⁻¹)

Ultimate: 4000 fb⁻¹, 7.5 x 10³⁴ cm⁻² sec⁻¹

現行最終ビーム収束4極磁石の放射線ダメージ

Prediction for nominal LHC at 300 fb⁻¹

The big technical bottleneck:
Radiation damage to triplet



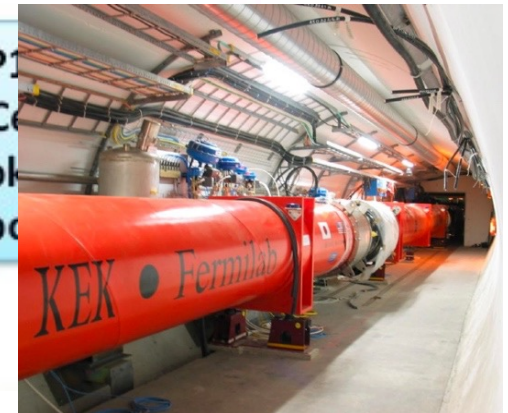
Cold bore insulation
≈ 35 MGy

外部Hell熱交換器

ルミノシティをリミット



WP
F. C
Mok
Esp



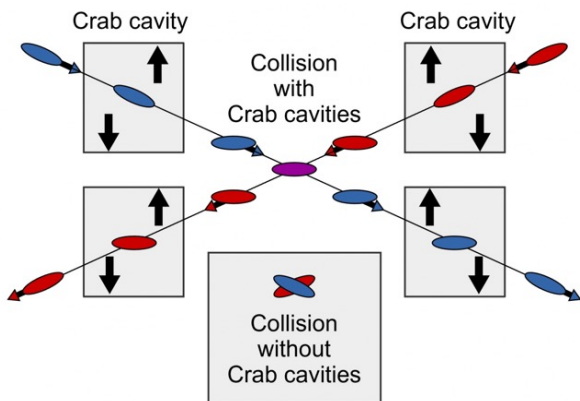
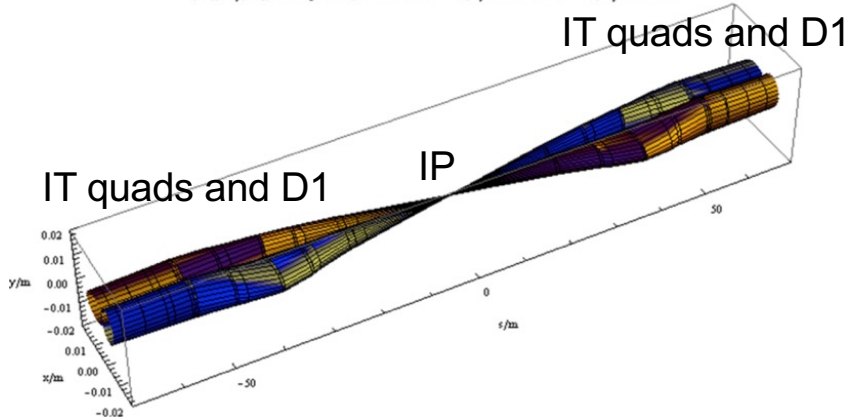
ルミノシティ増強のためのシナリオ

$$L = \underbrace{\gamma_r}_{\text{Energy}} \frac{\underbrace{N_b^2 n_b f_{rev}}_{\text{Beam current}}}{\underbrace{4\pi\epsilon_n \beta^*}_{\text{Beam Size}}} \underbrace{R}_{\text{Geometric reduction factor}}$$

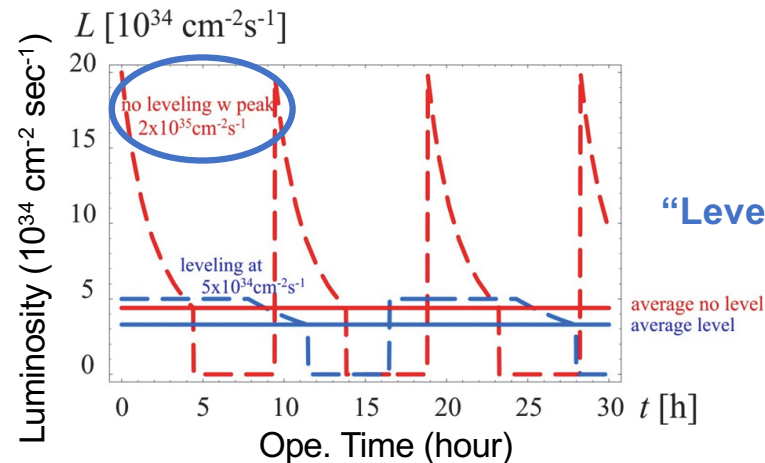
$$R = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2}$$

Geometric reduction factor

($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) envelope for $\epsilon_x = 5.02646 \times 10^{-10}$ m, $\epsilon_y = 5.02646 \times 10^{-10}$ m, $\sigma_z = 0.000111$

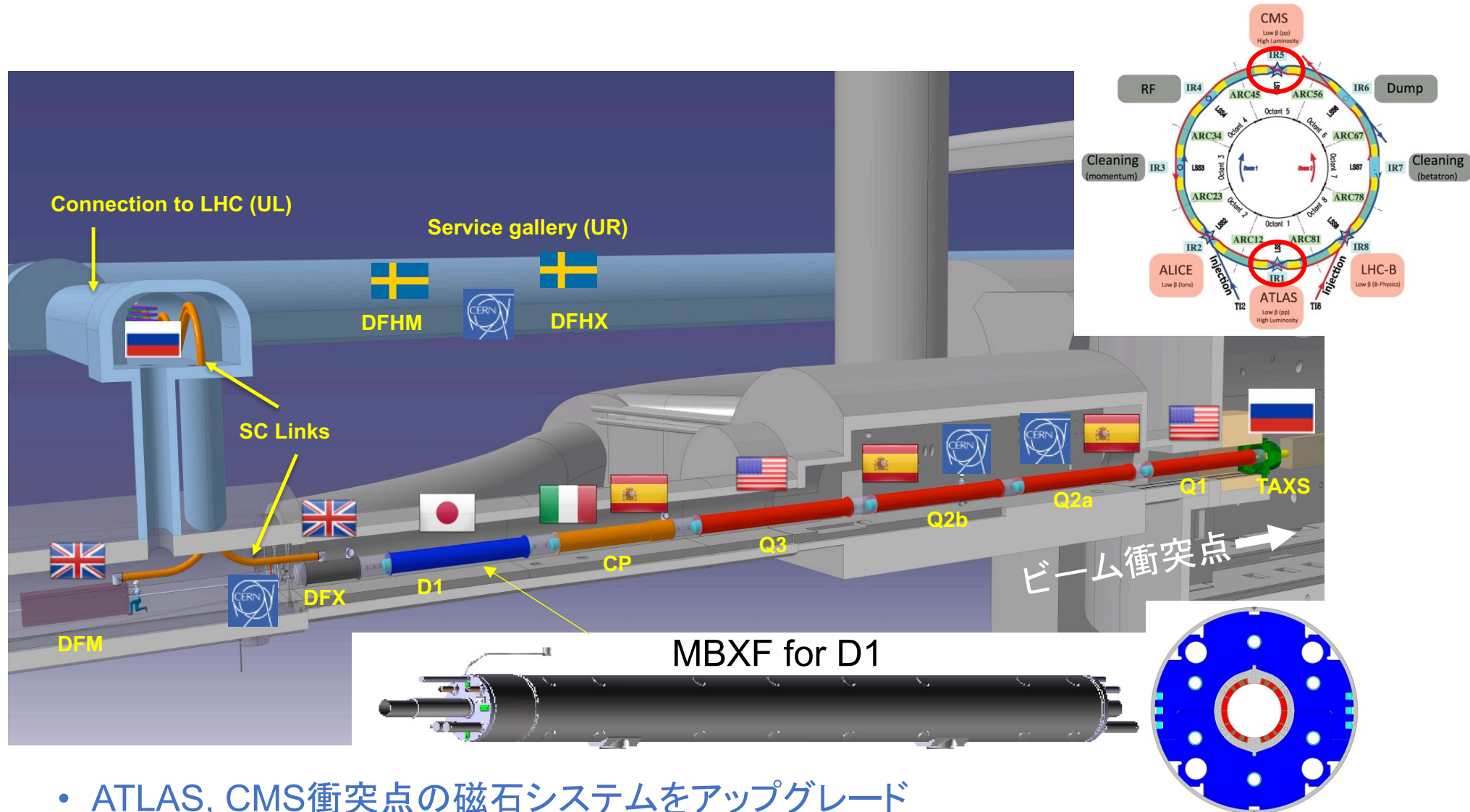


- **ビーム電流の増強 x 5.5**
 - LHC Injectors Upgrade (LIU)
 - エミッタンスを小さいままで
- **ビームサイズの縮小 x 3.7**
 - New IR magnets
 - 大口径超伝導4極磁石: Nb₃Sn(世界初)
 - ビーム分離用超伝導2極磁石 D1
 - 新しいビーム光学、レイアウト
 - Achromatic Telescopic Squeeze
 - ビーム公差角の拡大
- **幾何的衝突効率の向上 If not, x 1/2.8**
 - クラブ空洞の導入(陽子では世界初)
- **パイルアップ対策**
 - **ルミノシティを5x10³⁴にレベリング**



“Levelling Scheme”

HL-LHC最終ビーム収束部超伝導磁石システム

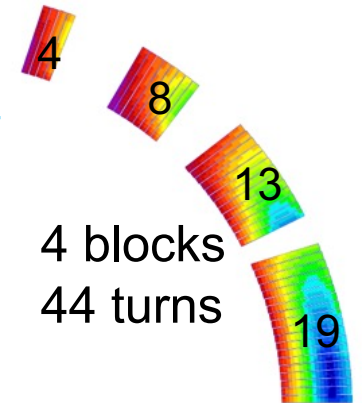
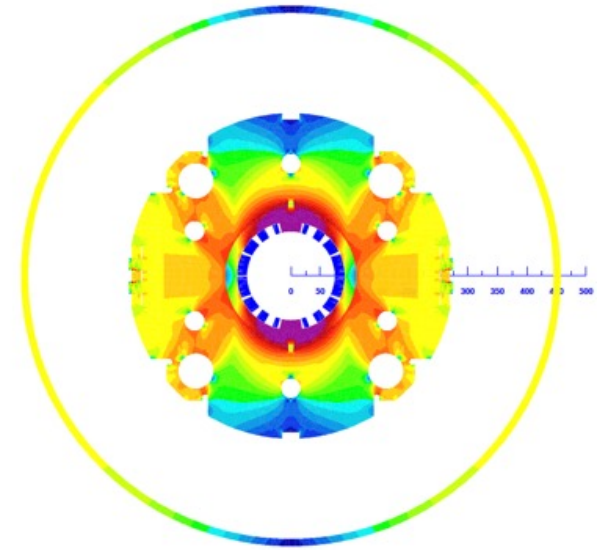
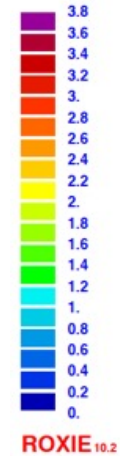


- ATLAS, CMS衝突点の磁石システムをアップグレード
- 超伝導磁石の高性能化: 大口径 (70mm → 150mm)、強磁場
- 最先端技術: Nb₃Sn超伝導線, 超伝導クラブ空洞
- 日本の貢献: ビーム分離用二極磁石 (MBXF) を7台製造、試験評価しCERNに提供

Design Parameters

	A series production (7m) MBXFS3 (2 m)	
Coil aperture	150 mm	
Field integral	35 T m	9.5 T m
Field (3D)	Nominal: 5.60 T, Ultimate: 6.04 T	
Peak field (3D)	Nominal: 6.58 T, Ultimate: 7.14 T	
Current	Nominal : 12.11 kA, Ultimate 13.23 kA	
Operating temperature	1.9 K	
Field quality	10^{-4} w.r.t B_1 ($R_{ref}=50$ mm)	
Load line ratio (3D)	Nominal: 76.5%, Ultimate: 83.1% at 1.9 K	
Differential inductance	Nominal: 4.0 mH/m	
Conductor	Nb-Ti: LHC-MB outer cable	
Stored energy	Nominal: 340 kJ/m	
Magnetic length	6.26 m	1.67 m
Coil mech. length	6.58 m	2.00 m
Magnet mech. length	6.73 m 12 ton	2.15 m
Heat load	135 W (Magnet total)	
	2 mW/cm³ (Coil peak)	
Radiation dose	> 25 MGy	

IBI flux density (T)



← NbTiダイポールで最高

← 瞬間ルミノシティと相関

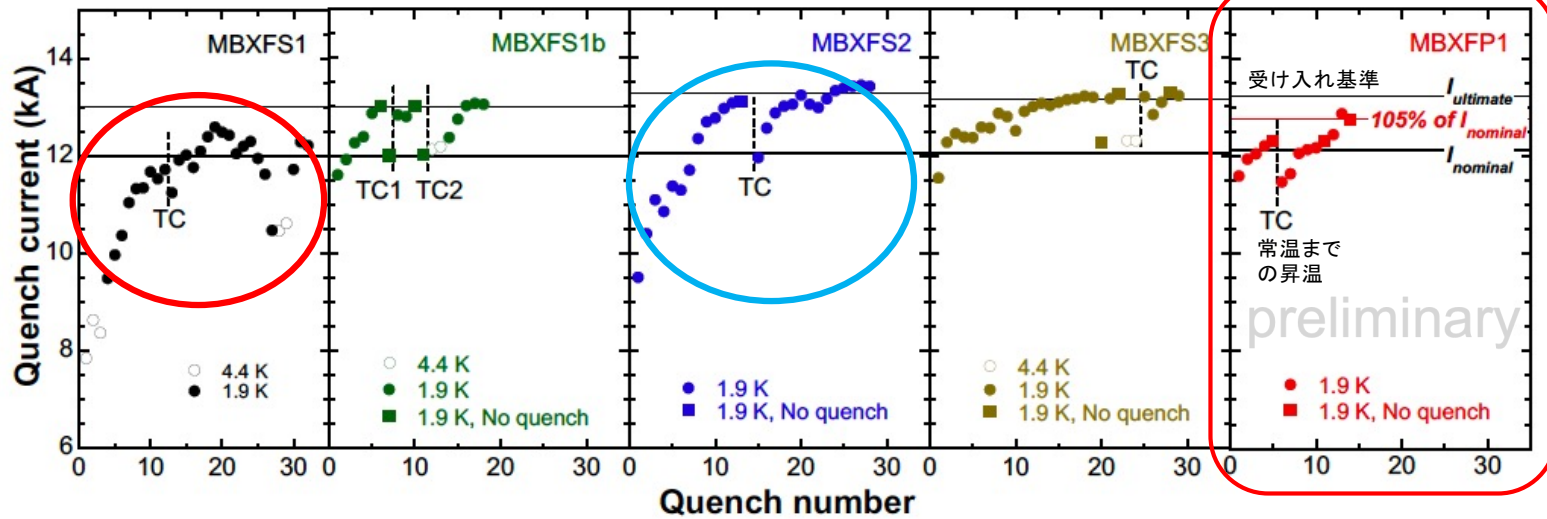
← 積分ルミノシティと相関

技術的チャレンジ

- 大口徑： コイルサイズ、予備応力の制御
- 鉄の飽和による磁場性能への影響
- 耐放射線性能、除熱性能： 素材開発。冷却の確保。

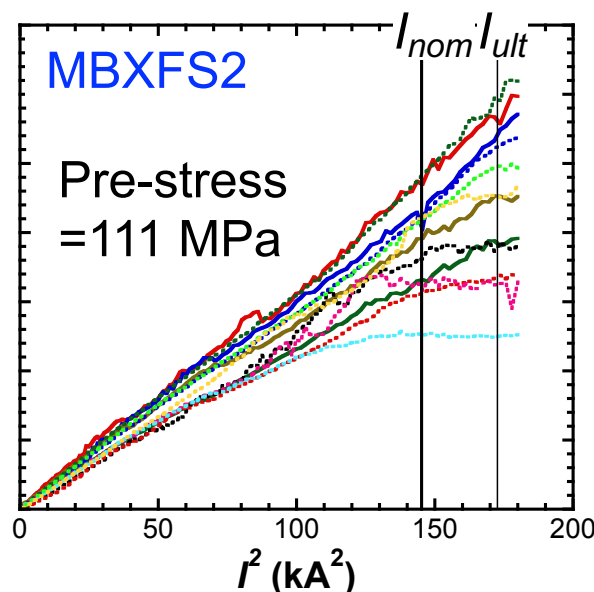
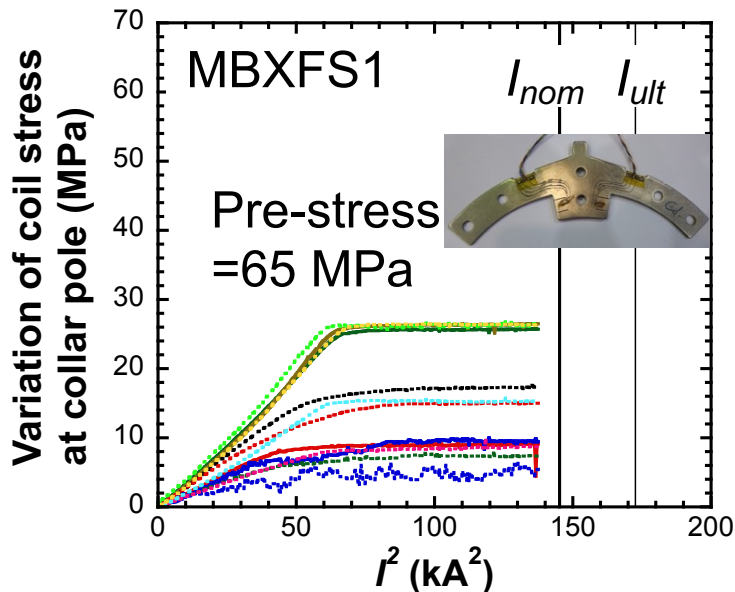
トレーニングクエンチ

2mモデル磁石

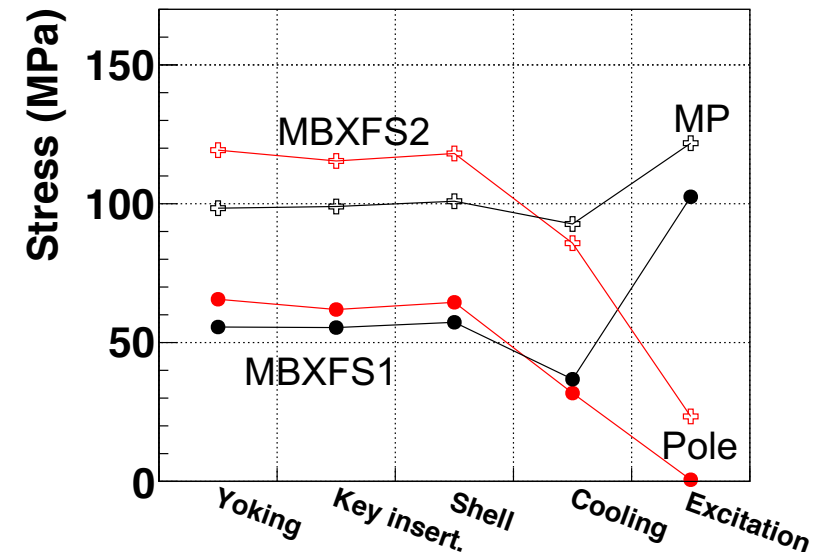


トレーニング性能に問題

トレーニング性能が改善



ANSYSによる応力計算結果



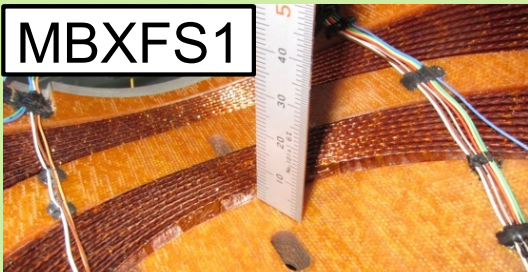
組み立て時の予備応力が不十分なため、励磁途中で抜けてしまった。

予備応力を改善し、目標電流に到達しても余力が残っている。

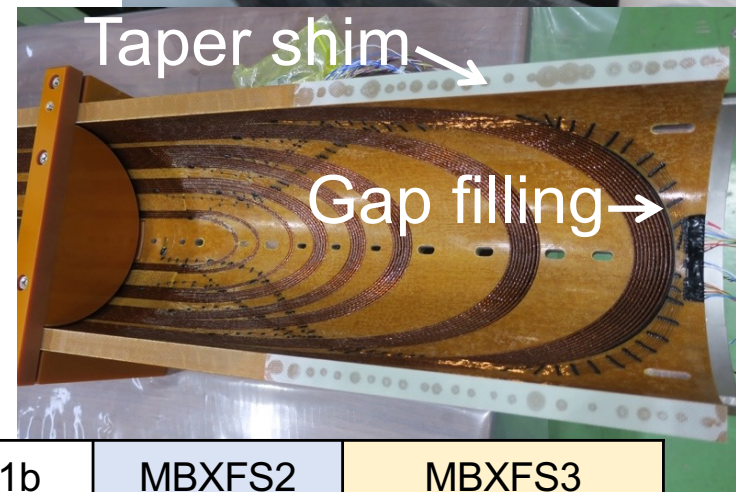
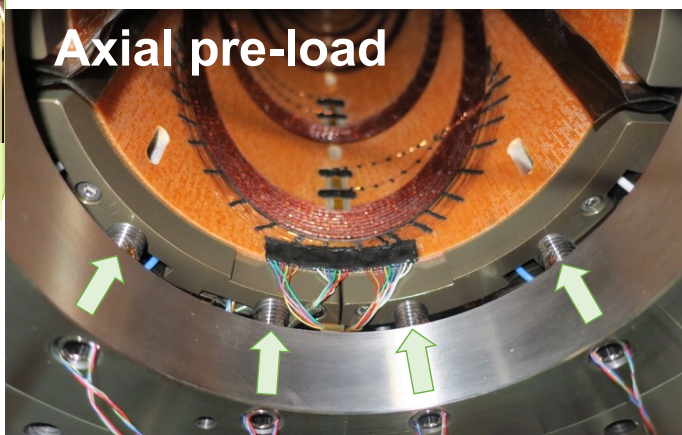
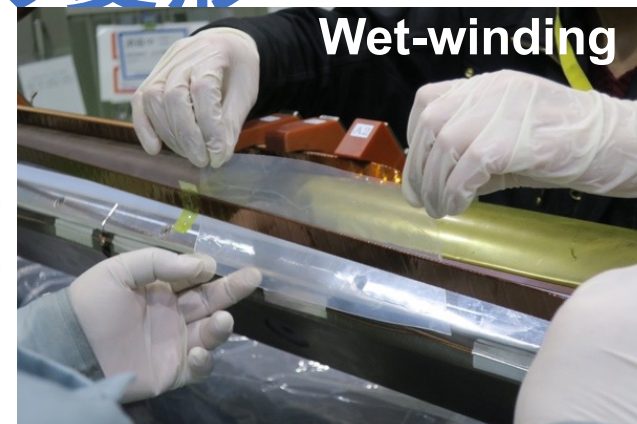
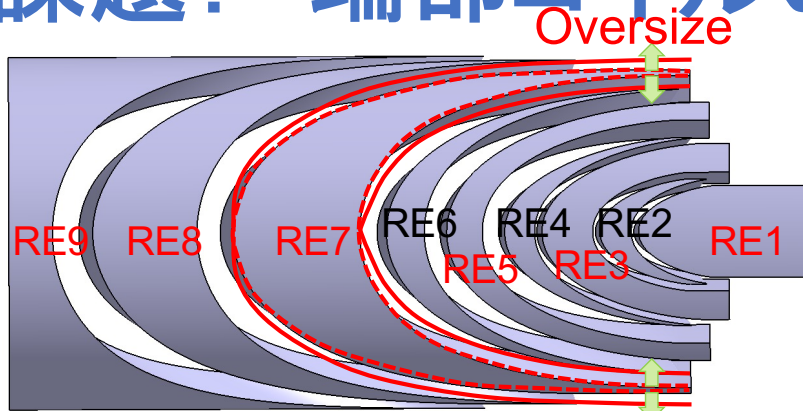
MBXFS1の課題： 端部コイルの変形

Cable deformation

MBXFS1



Max displacement
3.4 mm in MBXFS1
→ ~1 mm in MBXFS2



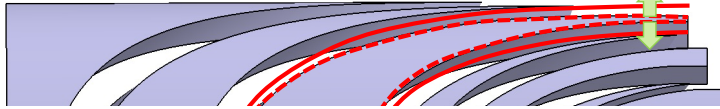
	MBXFS1	MBXFS1b	MBXFS2	MBXFS3
Oversize of end spacers wrt MBXFS1 (mm)	–	0.9	1.14	1.14
Wet-winding	No	No	Yes	Yes
Tightening torque of bullets (Nm)	14	14	20	24
Axial pre-load per coil end (kN)	–	–	30 – 43	25 – 40
Additional shim on end saddle	–	–	–	t0.7 mm at max
Gap filing with epoxy resin	No	No	No	Yes

MBXFS1の課題： 端部コイルの変形

Over-size



Cable deformation



MBXFS1

Top coil

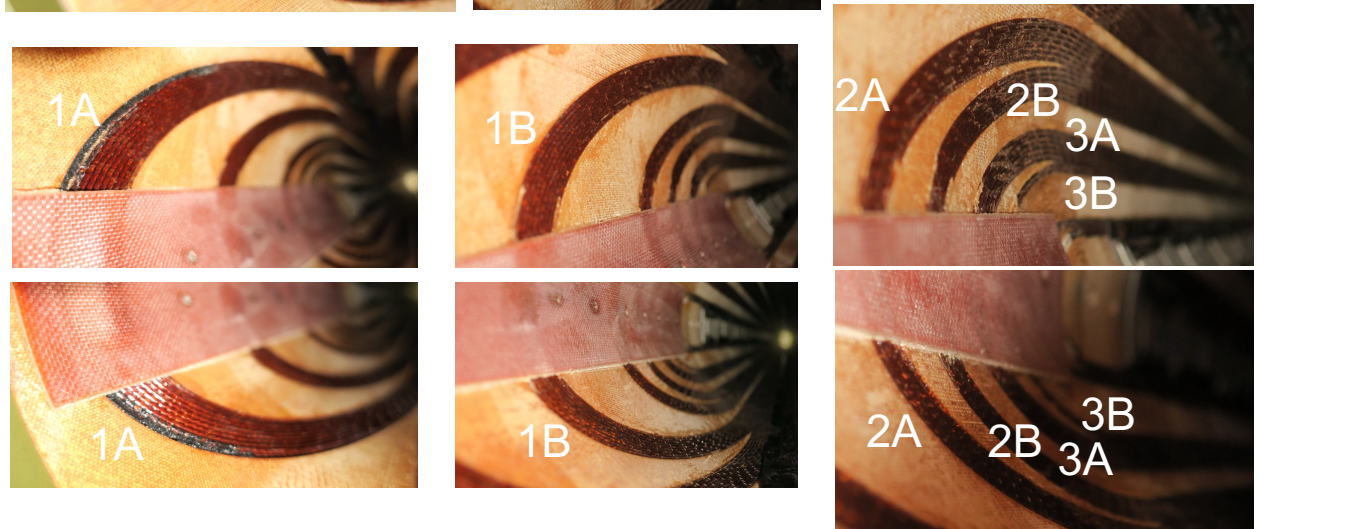
MBXFP1試験後の目視観察

Max displa
3.4 mm in l
→ ~1 mm i

LE



RE



Tig

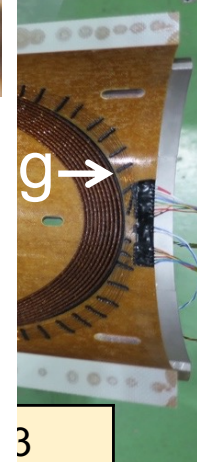
Ax

Ai

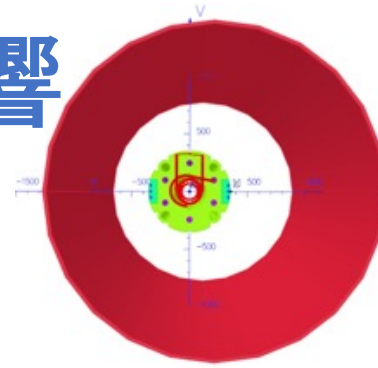
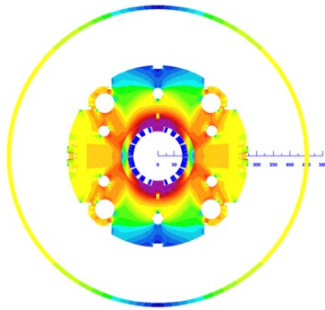
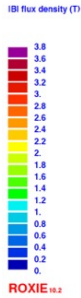
max

3

g →



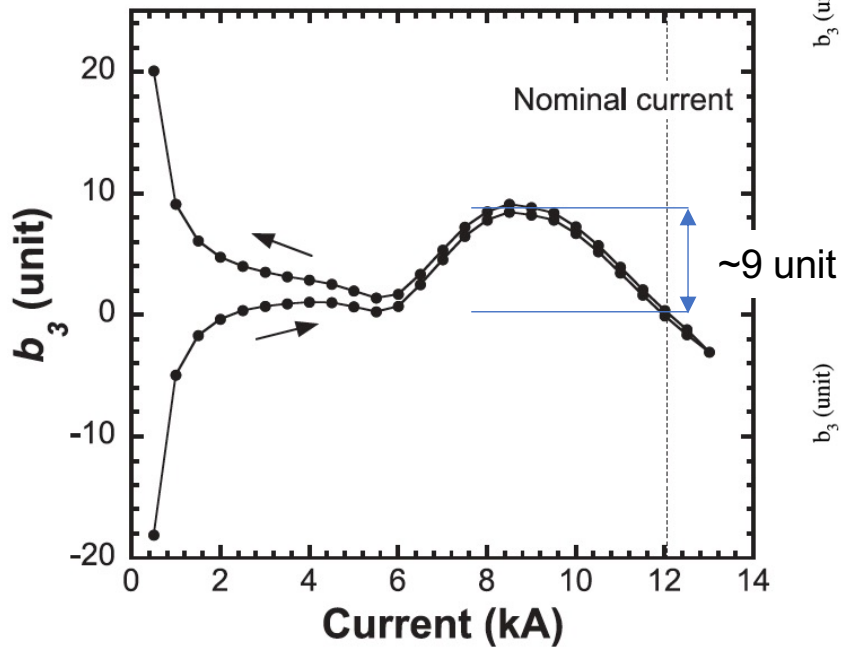
磁場特性：鉄の飽和の影響



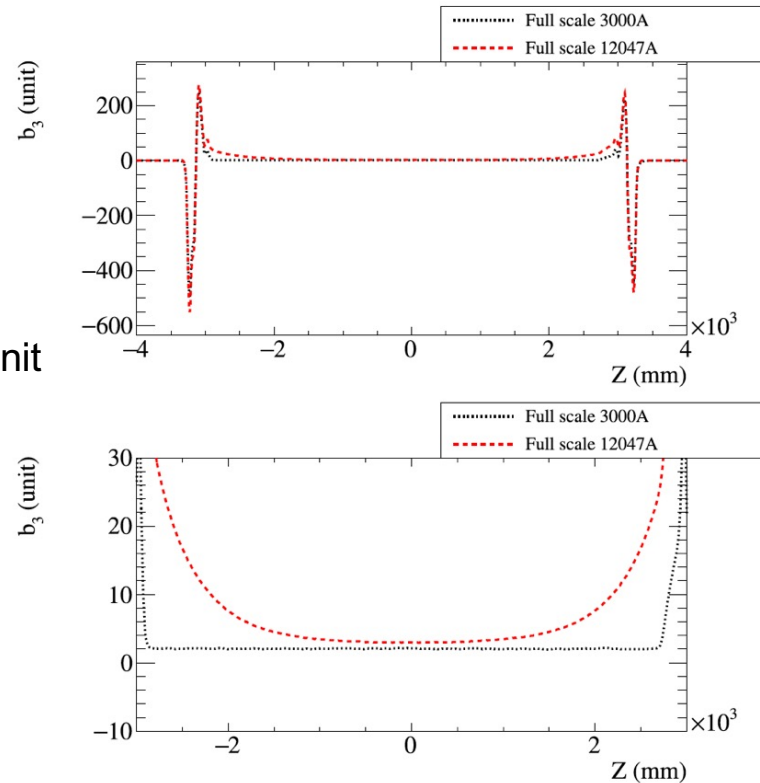
MBXFP1の磁場測定結果

	Magnet Center		Integral	
	Cal.	Meas.	Cal.	Meas.
b_3	-4.92	-8.51	-6.54	-12.66
b_5	4.88	6.68	4.77	6.45
b_7	0.75	0.98	0.30	0.50
b_9	0.98	1.35	0.46	0.75
b_{11}	0.04	-0.06	-0.17	-0.24
b_{13}	-0.78	-1.03	-0.80	-0.96
b_{15}	-1.33	-1.52	-1.30	-1.38

ROXIE2Dによる b_3 の電流依存性



OPERA3Dによる b_3 の長手方向分布



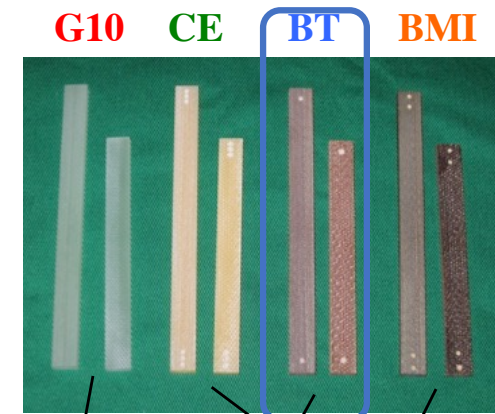
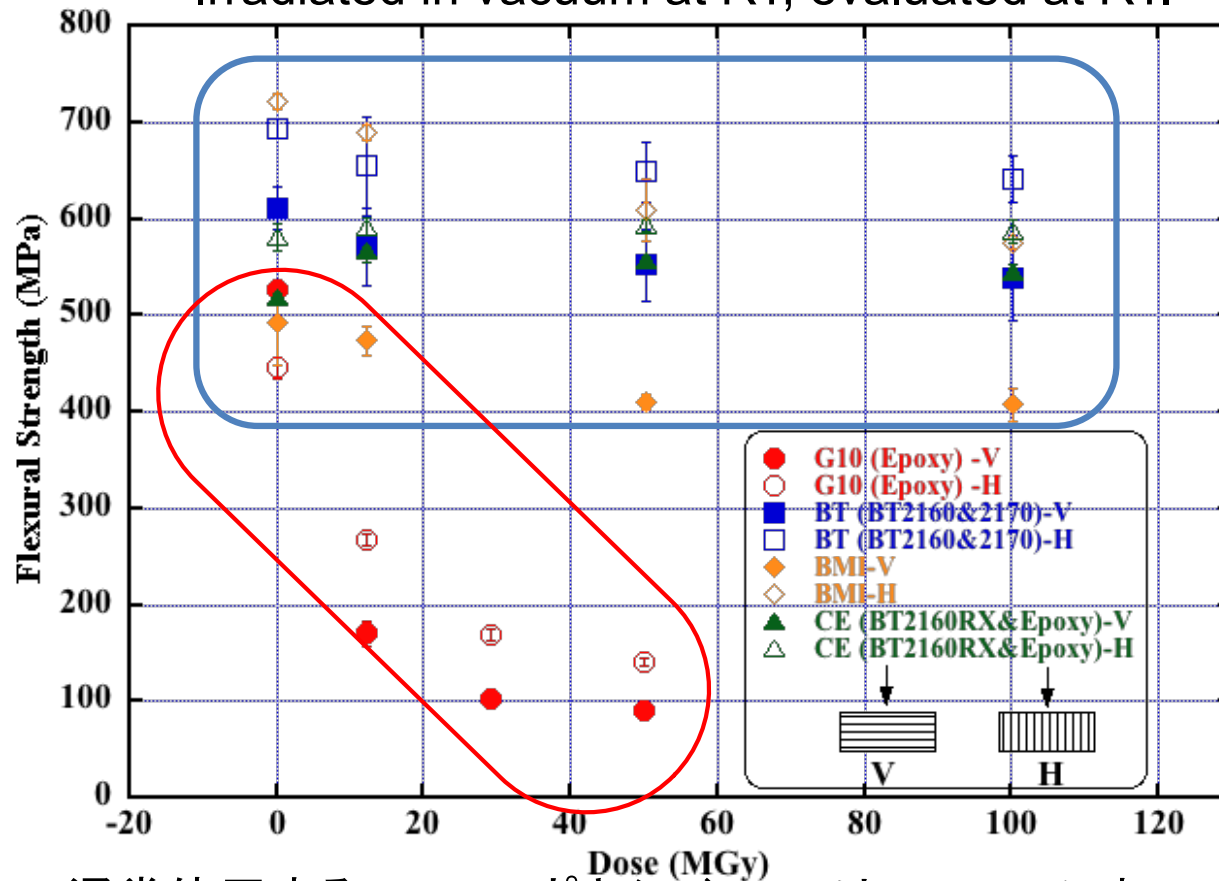
- 低電流ではコイル配置を反映。
- 4kAを超えると鉄の局所的な飽和の影響で変動する。

- 3kAでは、 b_3 の分布がコイルの端部形状を素直に反映される。ピークは端部に限定。
- 定格電流12kAでは、磁化の飽和する範囲が3次元的に拡大するため、端部から2m近くまで b_3 が侵食してくる。

- b_3 では計算との不一致が残ってしまう。3次元の飽和の影響を正確に予測することは困難。
- b_7 以上の多極成分では、非常に良く一致している。
- 実機磁石向けにコイル設計を微調整し、 b_3 及び b_5 を修正する。

耐放射線素材の開発

- JAEA Takasaki. ^{60}Co at 14-16 kGy/hr.
- Irradiated in vacuum at RT, evaluated at RT.



After irradiation of 13 MGy

- 通常使用するG10 (エポキシベース)は10 MGyにおいて、すでに顕著な劣化が見られる。
- 新規開発したGFRP(CE&Epoxy, BT, and BMI) はいずれも、100 MGyまでほとんど劣化が見られなかった。

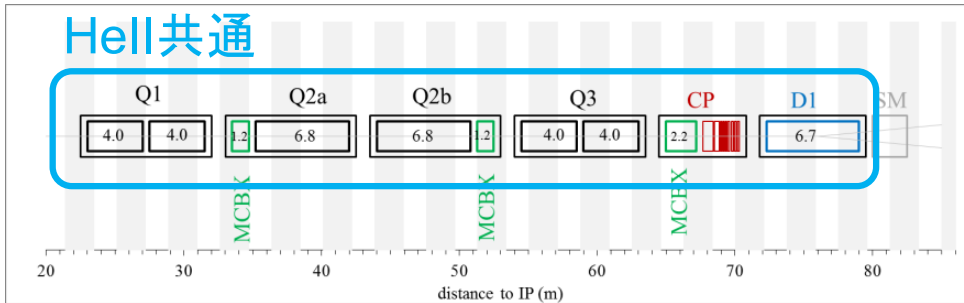
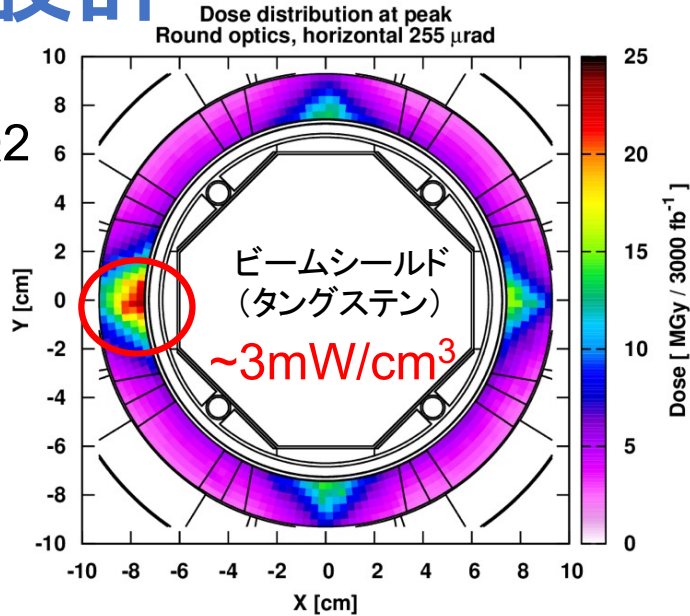
MBXF磁石開発にはBT樹脂S2ガラスGFRPを採用



BT GFRP製ウェッジ部品

冷却設計

HL-LHC
4極磁石Q2



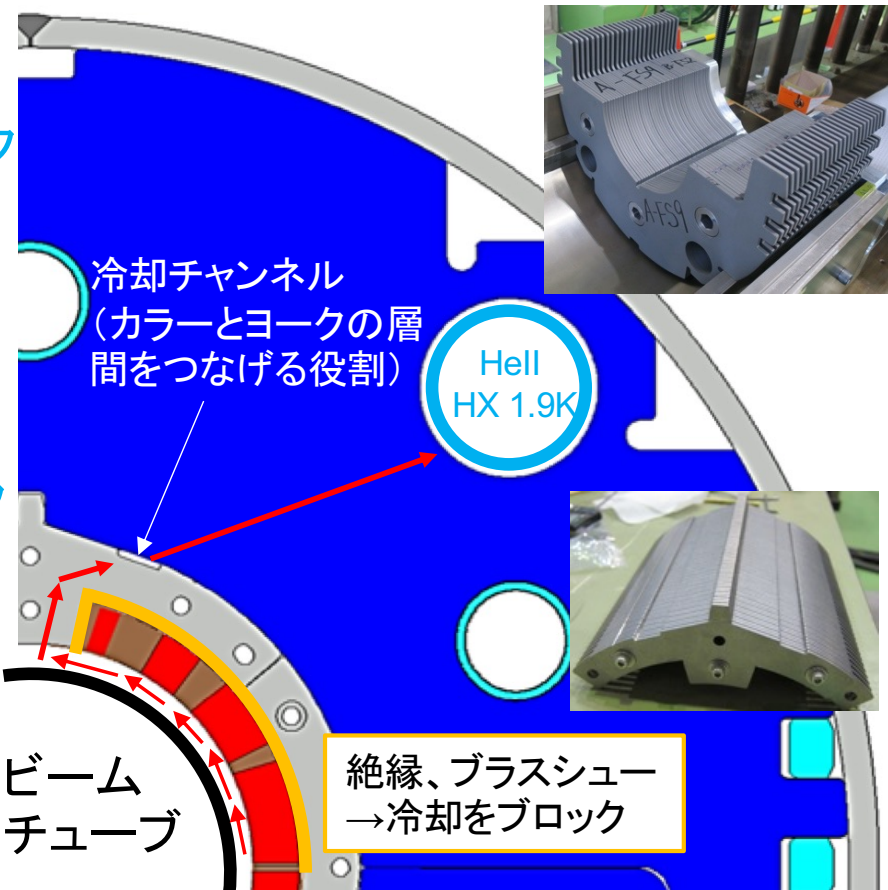
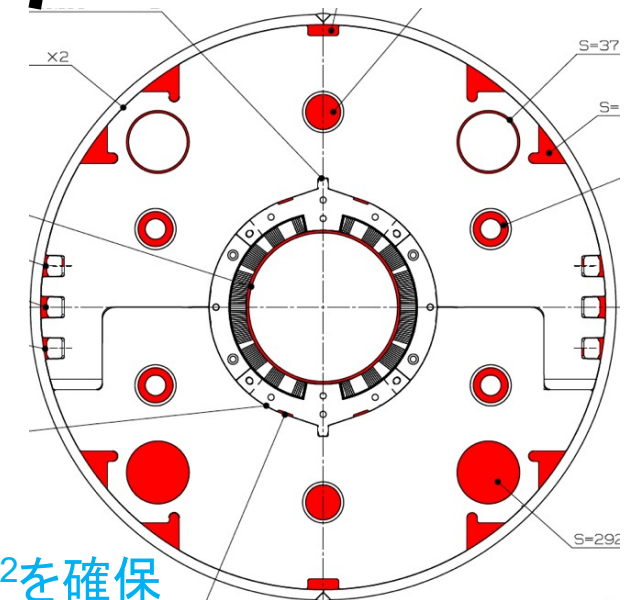
ヨークスタック
積層率98%

カースタック
積層率96%

径方向
ギャップ
1.9mm

ビーム
チューブ

絶縁、ブラスシュー
→冷却をブロック



- 衝突点からのデブリによる入熱: $\sim 2 \text{ mW}/\text{cm}^3$ at $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for D1
- 目標: コイル温度をHell冷却が期待できるラムダ点 (2.17K) 以下に抑える
- Hell熱交換器までのコンダクタンス確保が重要
 - 積層率: 96-98%
 - 径方向ギャップ1.9mmでのHell冷却が期待できる単層コイルを採用
- 連結する他の磁石とも熱負荷をバランスさせる必要
 - 長手方向へのフリーエリアの確保: $> 100 \text{ cm}^2$ for D1

180 cm²を確保