



LHC高輝度アップグレード用 超伝導磁石の開発（3） — 2 mモデル磁石製作

高エネルギー加速器研究機構(KEK)

菅野 未知央, 中本 建志, 榎本瞬, 川又弘史

岡田尚紀, 岡田竜太郎, 東憲男, 荻津透, 佐々木憲一, 木村誠宏

- HL-LHC計画
- D1磁石の概要
- 磁場設計
- 機械構造設計
- 2 mモデル磁石製作

2 mモデルの冷却・励磁試験結果
→ 次の講演(TUOL06 榎本)

CERN-LHC加速器の現状と日本の貢献

陽子衝突エネルギー(重心系)

- 7 + 7 TeV(設計)
- 2008年:ヘリウム流出事故
- 2010~2012年:Run1
4 + 4 TeVで運転
- 2013~2014年:Long shutdown 1
磁石間接続の補修
- 2015年~:Run2
6.5 + 6.5 TeVで運転中

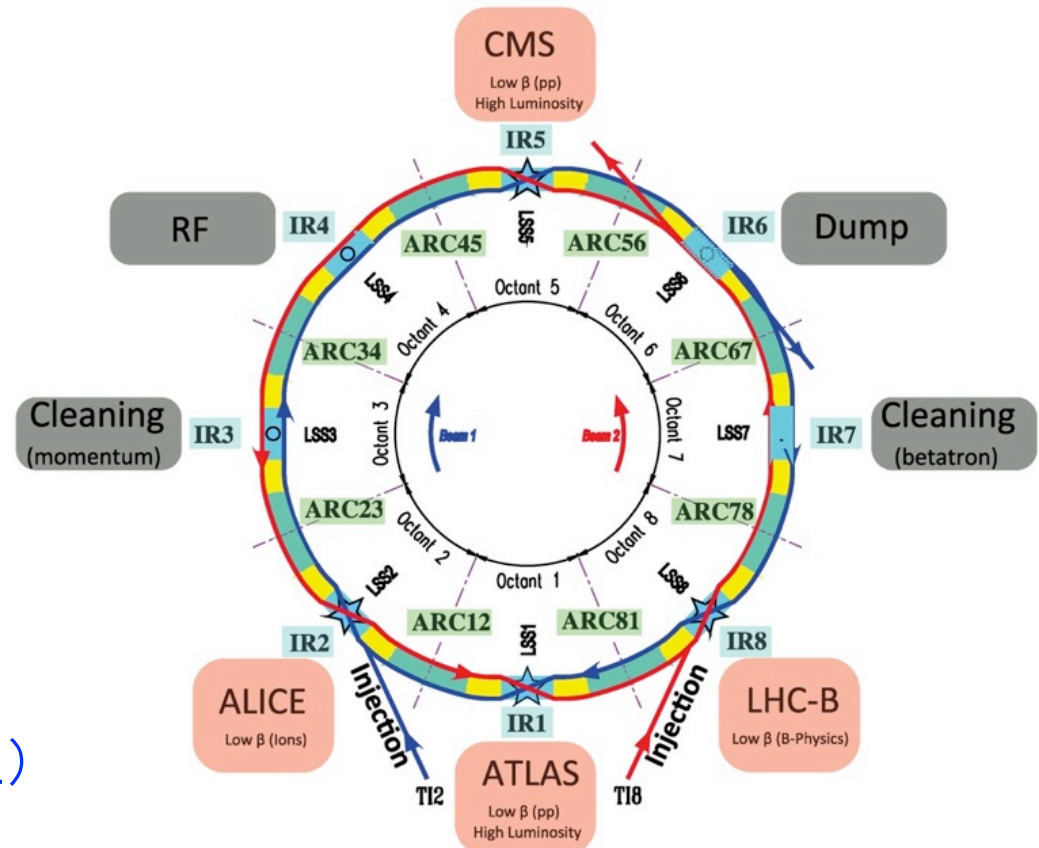
日本は1995年からLHC建設に参加

- ビーム衝突点四極磁石(KEKが分担)
- ATLAS検出器

高輝度アップグレード計画(HL-LHC)

ピーク luminositiy: $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (現状の5倍)
積分 luminositiy: 3000 fb^{-1} (現状の10倍)

KEKはATLAS実験の高精度化への貢献という立場からアップグレードに関する研究開発に参加。



ルミノシティアップグレードシナリオ

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

$$R = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_z)^2}{4\epsilon_n \beta^*} \gamma_r}$$

Geometric reduction factor

γ_r : ローレンツ因子, N_b : バンチあたりの陽子数
 n_b : バンチ数, f_{rev} : 1秒あたりの周回数
 β^* : 衝突点での β 関数, ϵ_n : 横方向規格化エミッタンス
 R : 交差角による幾何的損失係数
 θ_c : ビーム交差角, σ_z : 縦方向のビームサイズ

- ・ **ビーム強度の増加**

- 入射器アップグレード計画(LIU)
→ビーム強度と輝度を増強

- ・ **β^* の低減**

新しい衝突点磁石への入れ替え

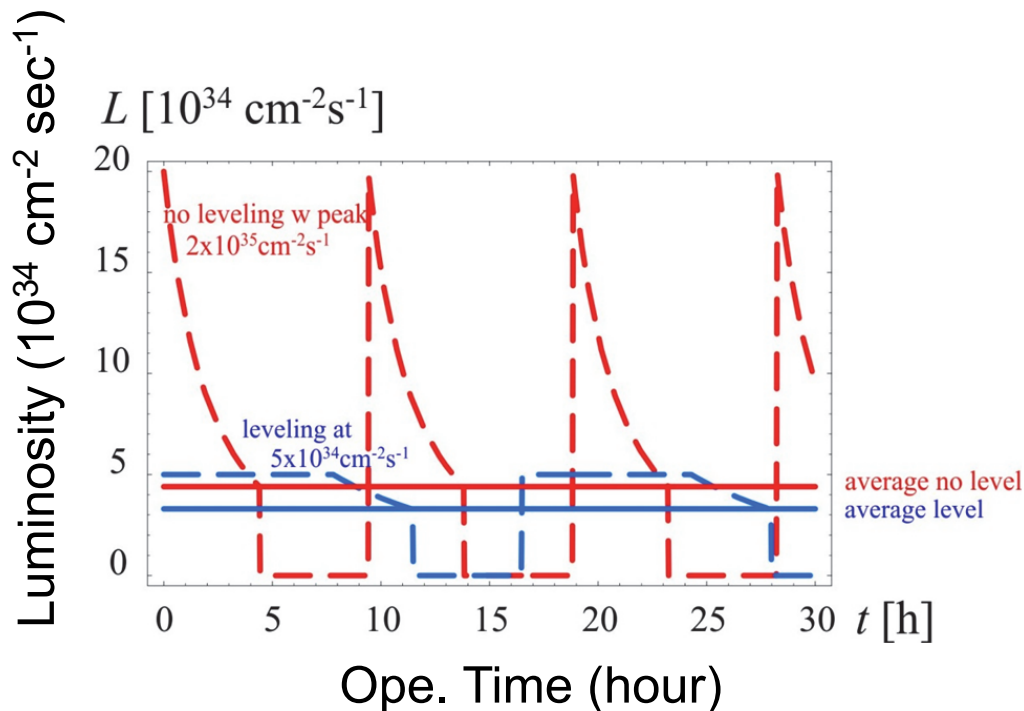
- ”大口径”最終収束四極磁石および
ビーム分離双極磁石

- ・ **新しいレイアウト&ビーム光学**

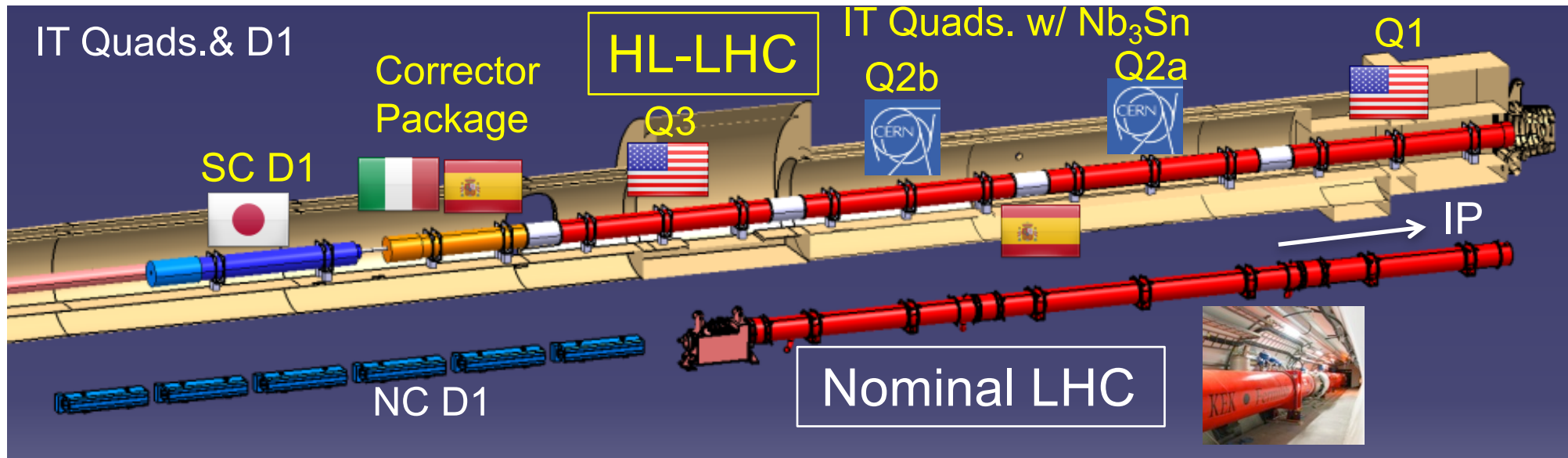
- 幾何的衝突効率(R)を向上
→クラブ空洞(陽子として初)

- ・ **パイルアップ対策**

- 四極磁石磁石の調整などにより
ルミノシティを 5×10^{34} にレベリング



D1磁石



Courtesy of P. Fessia

2024年頃設置を目指し、国際協力のもとに衝突点近傍の超伝導磁石システムの高性能化開発が進行中

日本(KEK)の分担

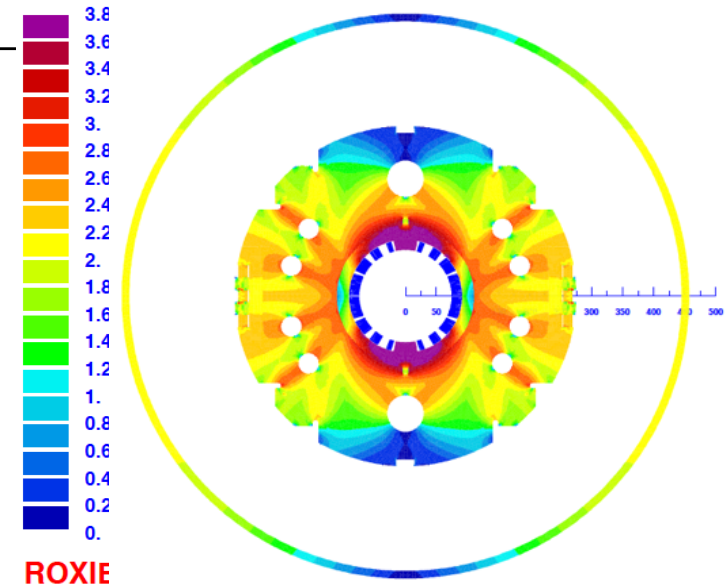
ビーム分離双極磁石(D1磁石)

- 衝突点でよりビームを細く絞るための**大口径化**
(ボア径: $\phi 70 \text{ mm} \rightarrow \phi 150 \text{ mm}$)
- D1-D2間距離が短くなるため、**より強いキック**が必要
(積分磁場 $26 \text{ Tm} \rightarrow 35 \text{ Tm}$)

既存の常伝導磁石をNb-Ti超伝導磁石に置き換え

ビーム分離双極磁石(D1)の設計パラメーター

	実機	2 mモデル
コイル内径	150 mm	
積分双極磁場	35 T·m	9.8 T·m
定格磁場	5.57 T	
ピーク磁場	6.44 T (直線部), 6.56 T (端部)	
運転電流	12.0 kA	
運転温度	1.9 K	
磁場精度	<math><10^{-4}</math> w.r.t B_1 ($R_{ref}=50$ mm)	
負荷率	75.4% (直線部), 76.6% (端部) @ 1.9 K	
微分インダクタンス	4.0 mH/m	
蓄積エネルギー	340 kJ/m	
磁場長	6.33 m	1.73 m
コイルの機械長	6.57 m	2.00 m
磁石の機械長	6.72 m	2.15 m
熱負荷	135 W (磁石全体) 2 mW/cm ³ (コイルピーク)	
コイル線量	> 25 MGy	

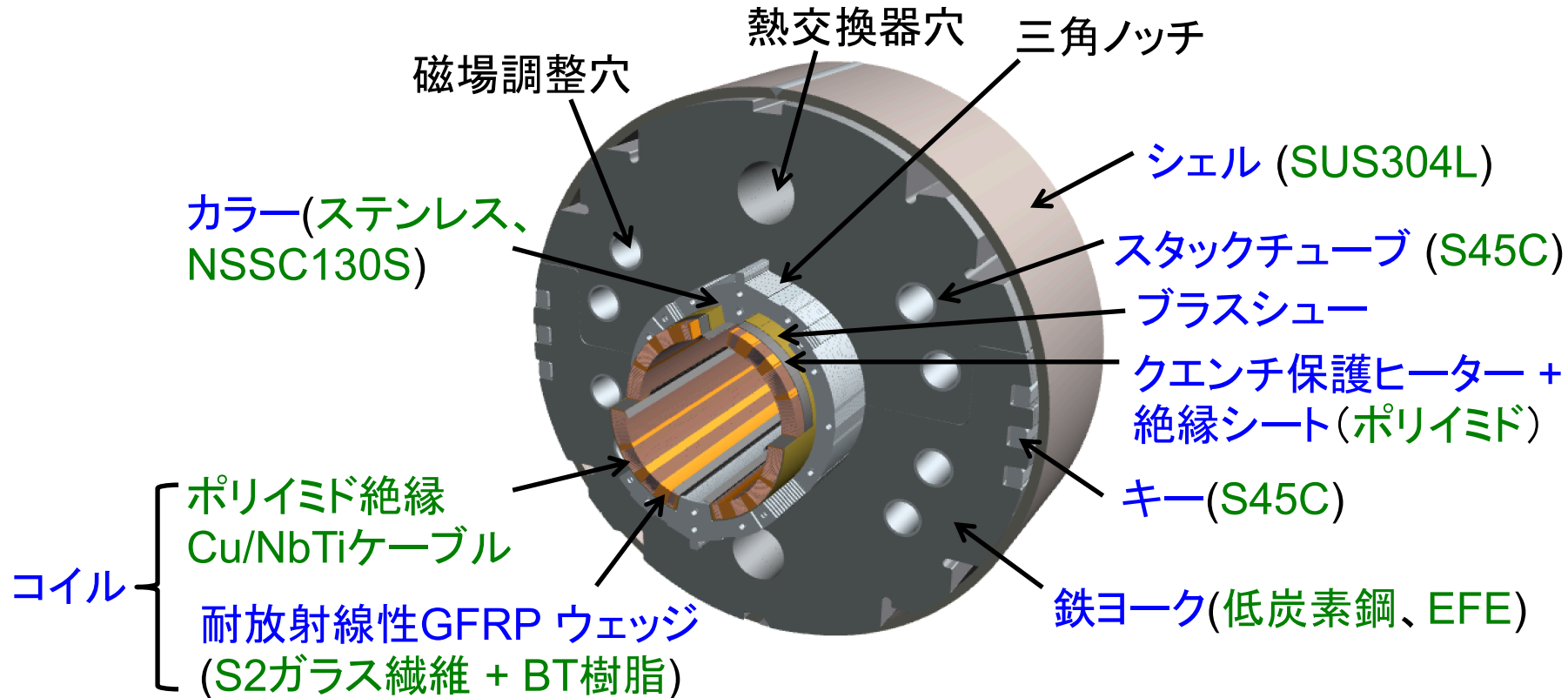


鉄ヨークの磁場分布

技術的課題

- ・ **大口径化**: 製作時、冷却、励磁によるコイル変形量大 → 予備応力、磁場精度
- ・ **耐放射線性**: 構成材料の選択、除熱を考慮した磁石構造
- ・ **鉄の飽和**: 磁場設計で考慮

D1磁石の概要

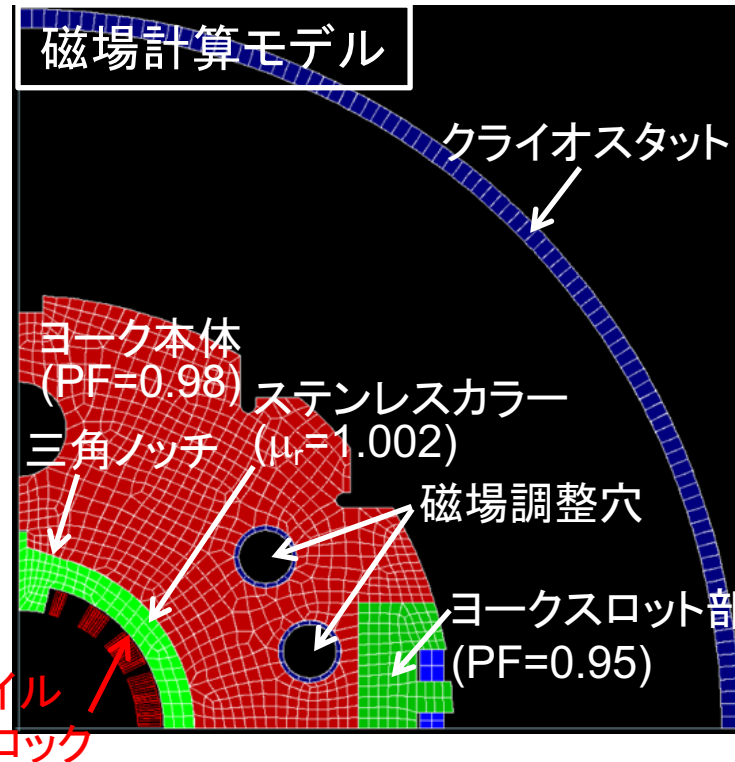
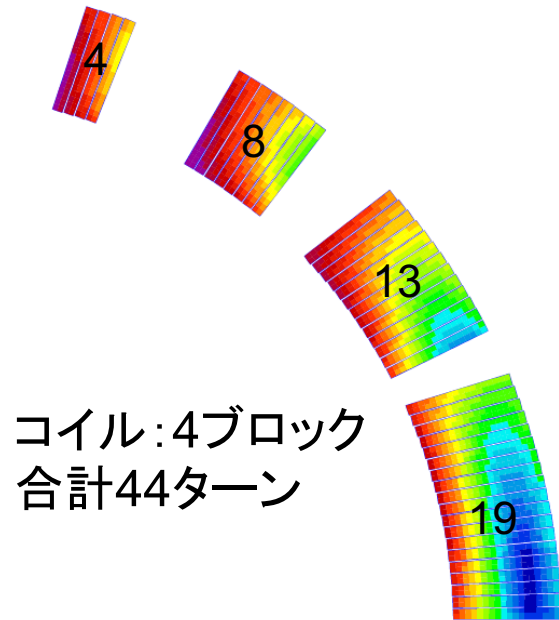


- コイル: $\cos\theta$ コイル、ポリイミド絶縁Cu/Nb-Tiラザフォードケーブル
- **カラーヨーク構造**: カラーは位置決め、スペーサーの役割のみ、ヨークで構造支持
→鉄の量を増加(過去にKEKで開発したLHC最終収束4極磁石、J-PARCのSCFMと同様)
- **除熱**のための構造:
 - ・ **単層コイル**
 - ・ 空隙と積層カラー、ヨークの充填率 $<100\%$ →超流動ヘリウムの流路確保
- 耐放射線性: 耐放射線性GFRP (S2 glass + BT樹脂)、接着剤(シアネートエステル)
- 鉄の飽和の影響緩和: 三角ノッチ、磁場調整穴

磁場設計

直線部断面(2D断面)の最適化

コイル直線部断面

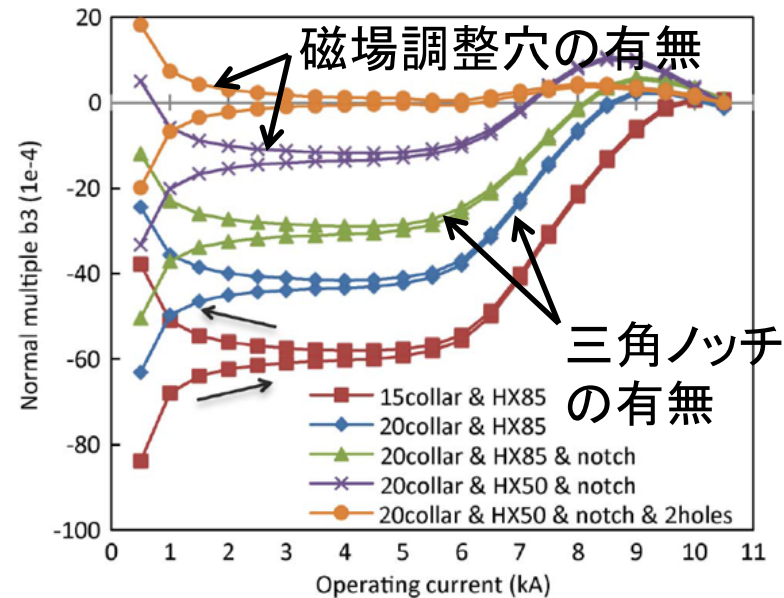


以下の項目をモデルに反映

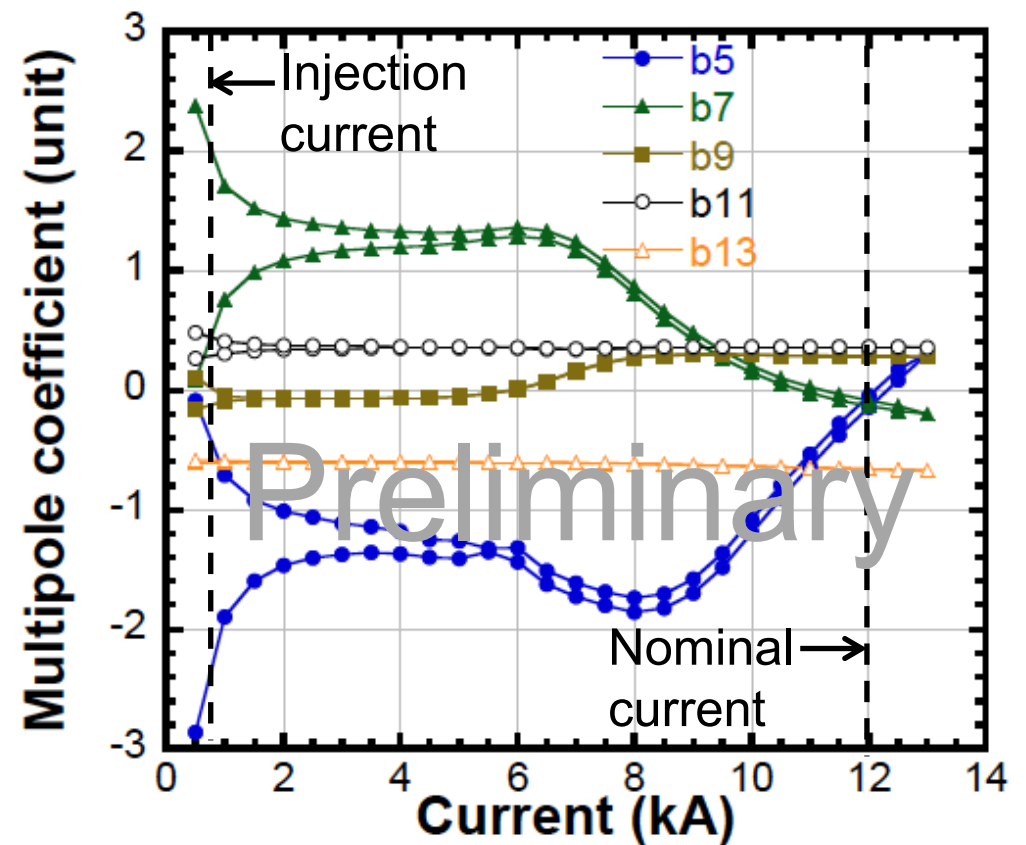
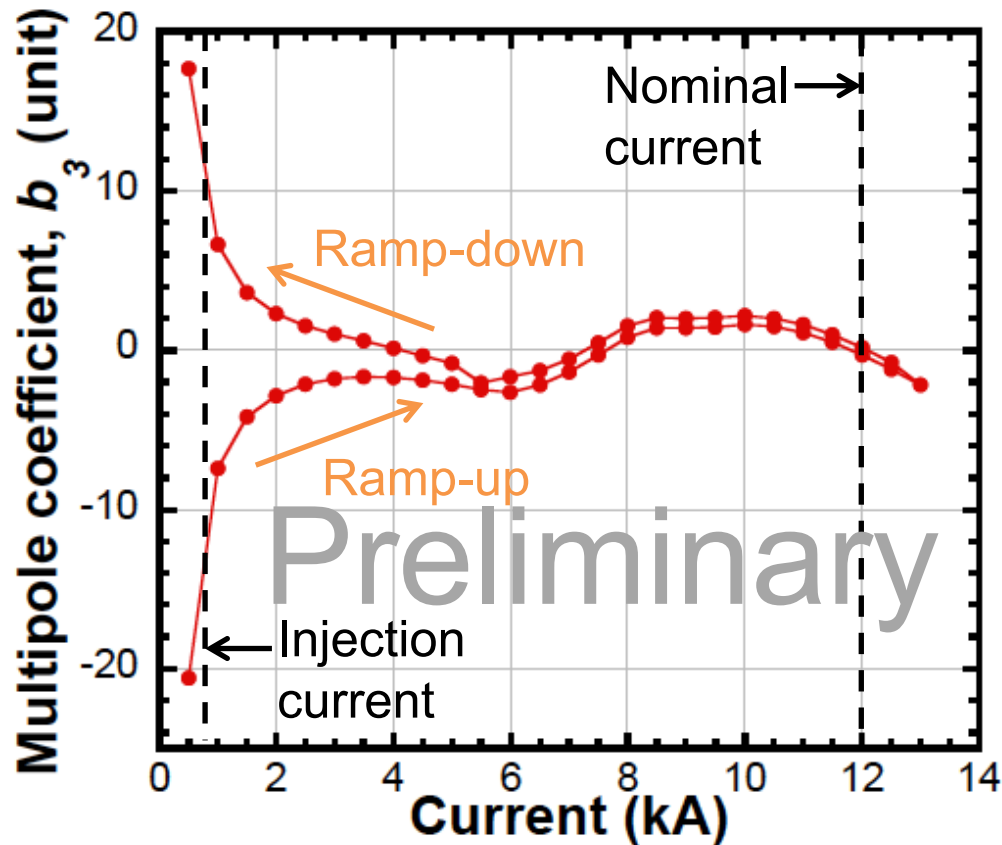
- 鉄の非線形なB-H曲線
- 鉄クライオスタット
- 鉄部分の充填率の違い
- ステンレスカラーのわずかな比透磁率

多極磁場成分低減の方策

- コイルブロック配置
- 鉄ヨークの三角ノッチ、磁場調整穴



最適化後の多極磁場係数



多極磁場展開

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

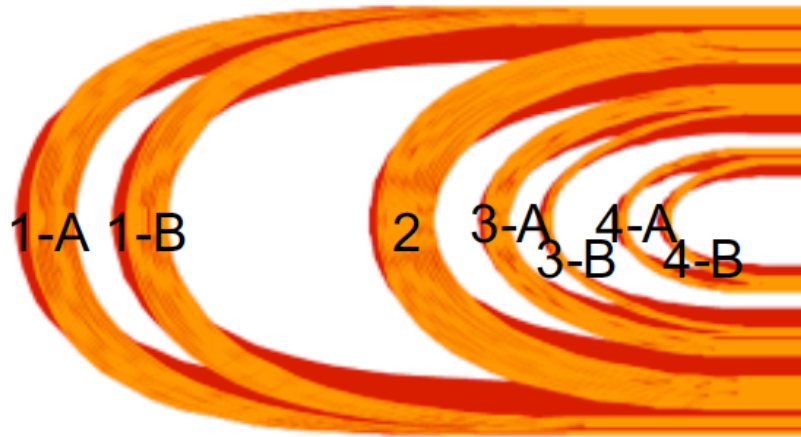
b_n : normal成分, a_n : skew成分

B_{ref} : 主双極磁場, R_{ref} : 参照半径

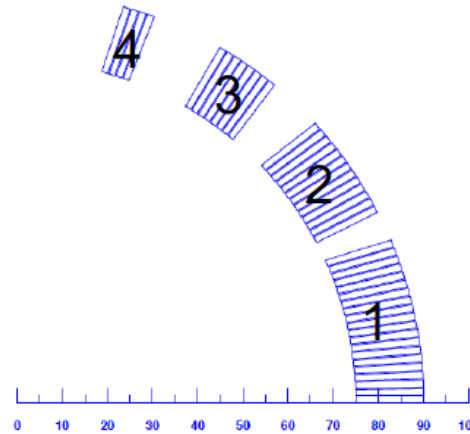
- Nominal currentで b_n が1 unit以下
- 鉄の飽和の影響による b_3 の変動($I > 6$ kA)が数unit以内
- Injection currentでの $b_3 < \pm 15$ unit

コイル端部形状の最適化

最適化後のコイル端部形状



対応する2D断面



7 mコイル全長での積分多極磁場
(unit, $I=12.0$ kA)(unit)

\bar{b}_3	0.49	\bar{b}_{15}	-1.09
\bar{b}_5	0.27	\bar{b}_{17}	-0.74
\bar{b}_7	-0.64	\bar{b}_{19}	0.38
\bar{b}_9	-0.45	\bar{a}_1	-4.75
\bar{b}_{11}	0.033	\bar{a}_3	1.67
\bar{b}_{13}	-0.72		

以下の目的のため、7 m実機に対して最適化。

- エンドを含むコイル全体の平均多極磁場成分の低減
- ケーブルひずみの低減 → エンド長さ、形状の調整
→ エンドブロックの軸方向位置の調整
- ピーク磁場の低減、エンドでのケーブル角度予測容易化 → 再分割

$$\bar{b}_n = 10^4 \times \frac{\int B_n(I_{nom,z}) dz}{\int B_1(I_{nom,z}) dz}$$

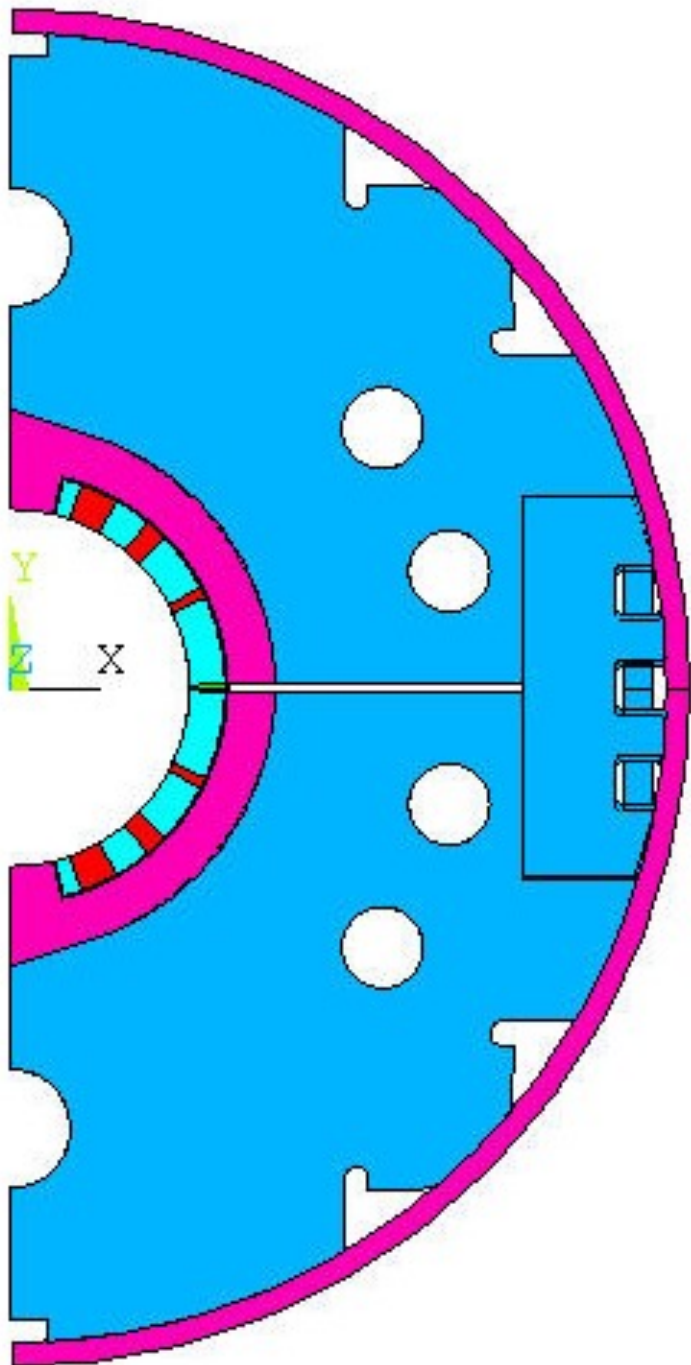
$$\bar{a}_n = 10^4 \times \frac{\int A_n(I_{nom,z}) dz}{\int B_1(I_{nom,z}) dz}$$

7 mコイル全長でのnormal成分はほぼ1 unit以下
(skew成分は非対称な配置のランプリードによるもの)

2 mモデル磁石は直線部が短縮されているが、同じ端部形状。

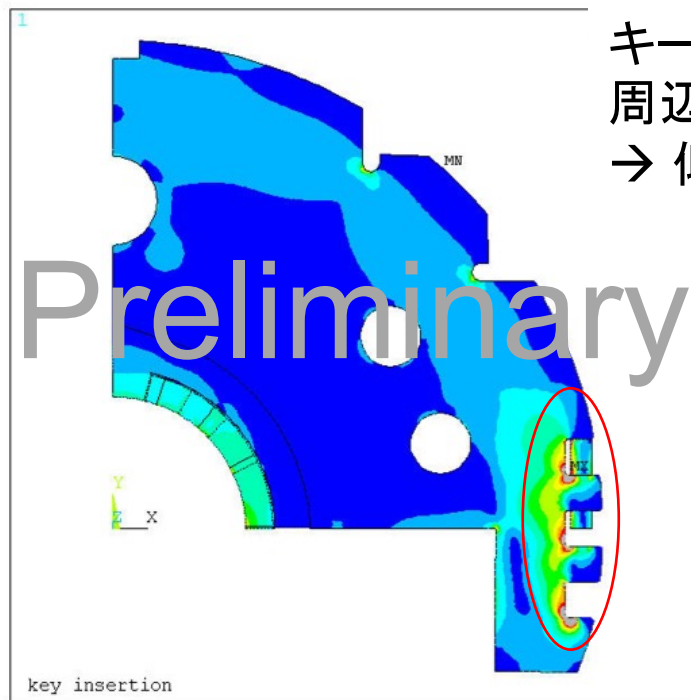
機械構造設計

ANSYSによる応力解析

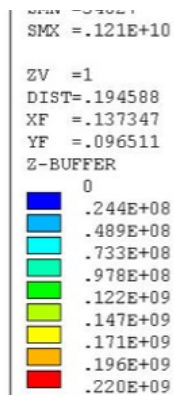


2Dモデルによる磁石組み立て、冷却、励磁過程を模擬した計算

- ・ カラーリング
- ・ ヨーキング
ヨーク肩への荷重負荷
キー挿入
- ・ シェル溶接
- ・ 冷却(2 K)
- ・ 励磁(定格電流の110%まで)

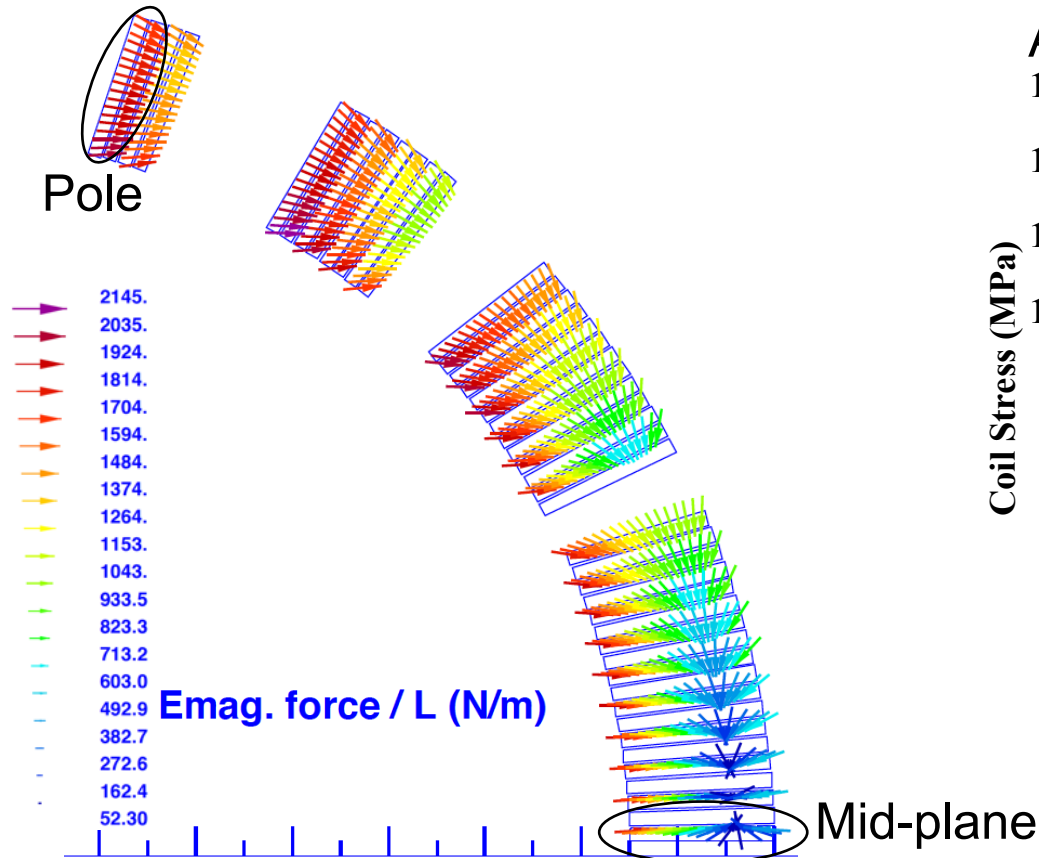


キー挿入後のヨークキー溝
周辺の応力 < 220 MPa
→ 低炭素鋼の降伏応力以下

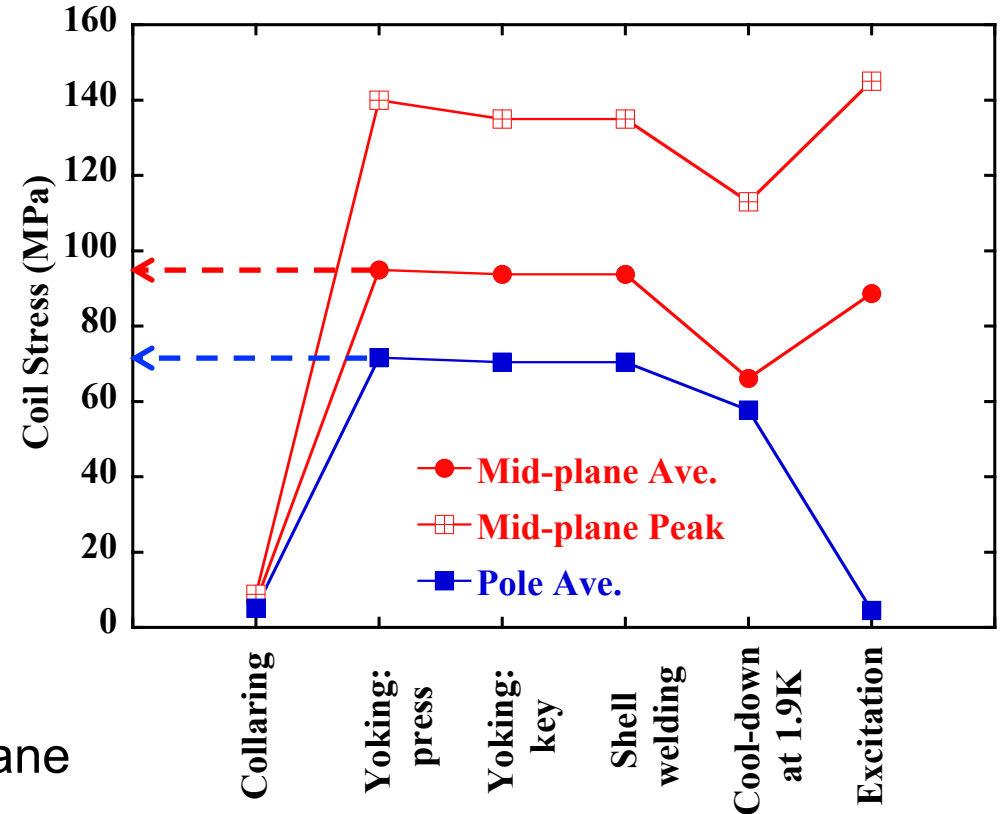


コイルに負荷する予備応力

コイルに作用する電磁力



各製作段階、冷却、励磁後のコイル応力のANSYS計算結果(プラスの値が圧縮応力)



– Pole付近ターンにはPoleから引き離す方向の電磁力。圧縮の予備応力で保持。

– コイルを大きく製作し、ヨーキング時に最終寸法に圧縮することで圧縮予備応力発生

– ANSYS計算からPoleで70 MPaの圧縮予備応力が必要
 → 予備応力の設計値:80 MPa(Pole) (Mid-planeでは104 MPa)

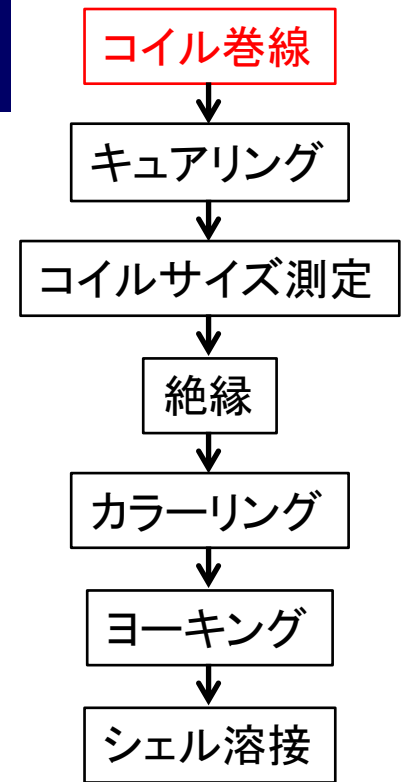
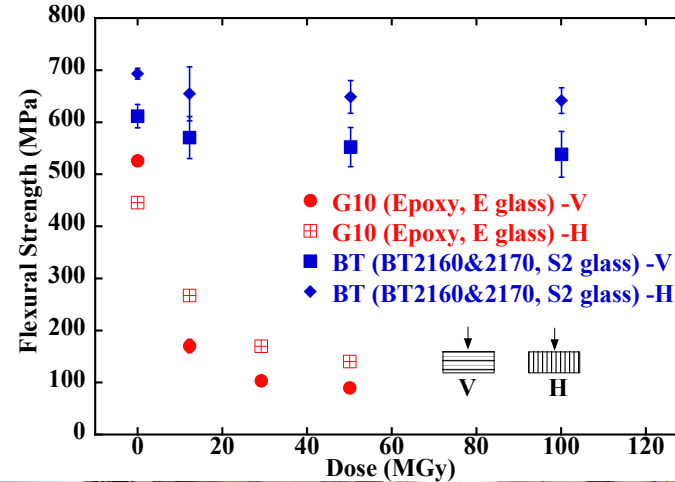
2 mモデル磁石製作

コイル巻線

耐放射線性GFRP製スペーサー

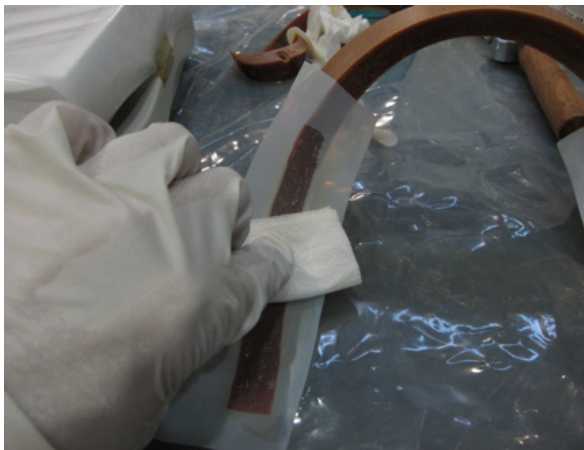
S2ガラス繊維+ビスマレイミドトリアジン樹脂

100 MGyまでの γ 線照射で曲げ強度の劣化なし(G10では10 MGyで劣化)



耐放射線性接着剤

シアネートエステルをスペーサーとケーブルの接着に使用



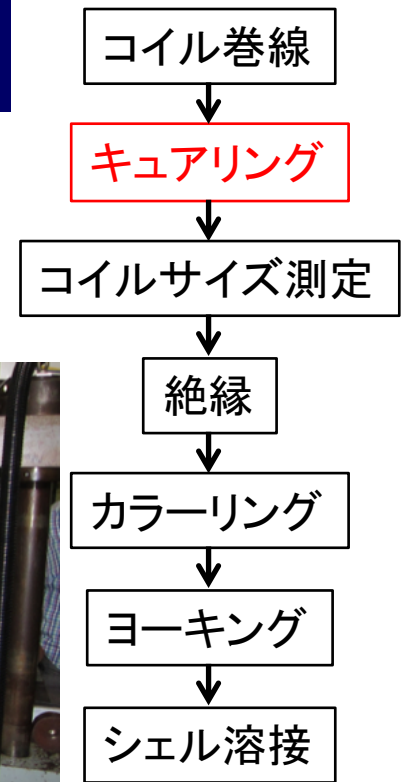
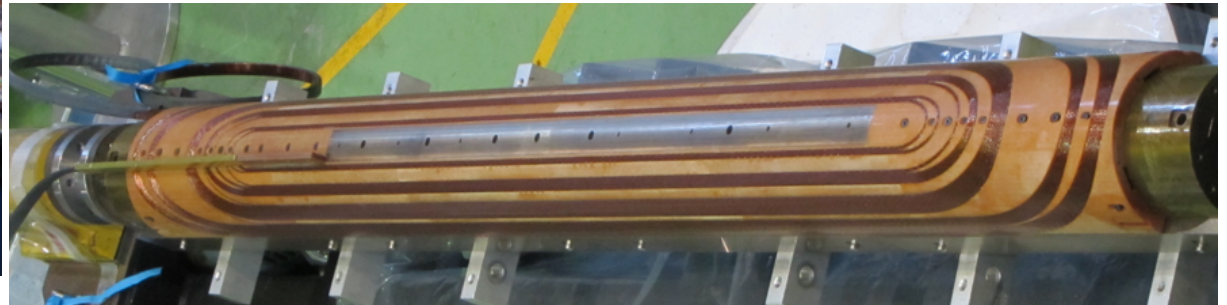
シアネートエステル塗布作業



2 mコイル2台を巻線

キュアリング

コイル成形、スペーサー/ケーブル、ケーブル同士の接着のための
加圧熱処理



温度プロファイル

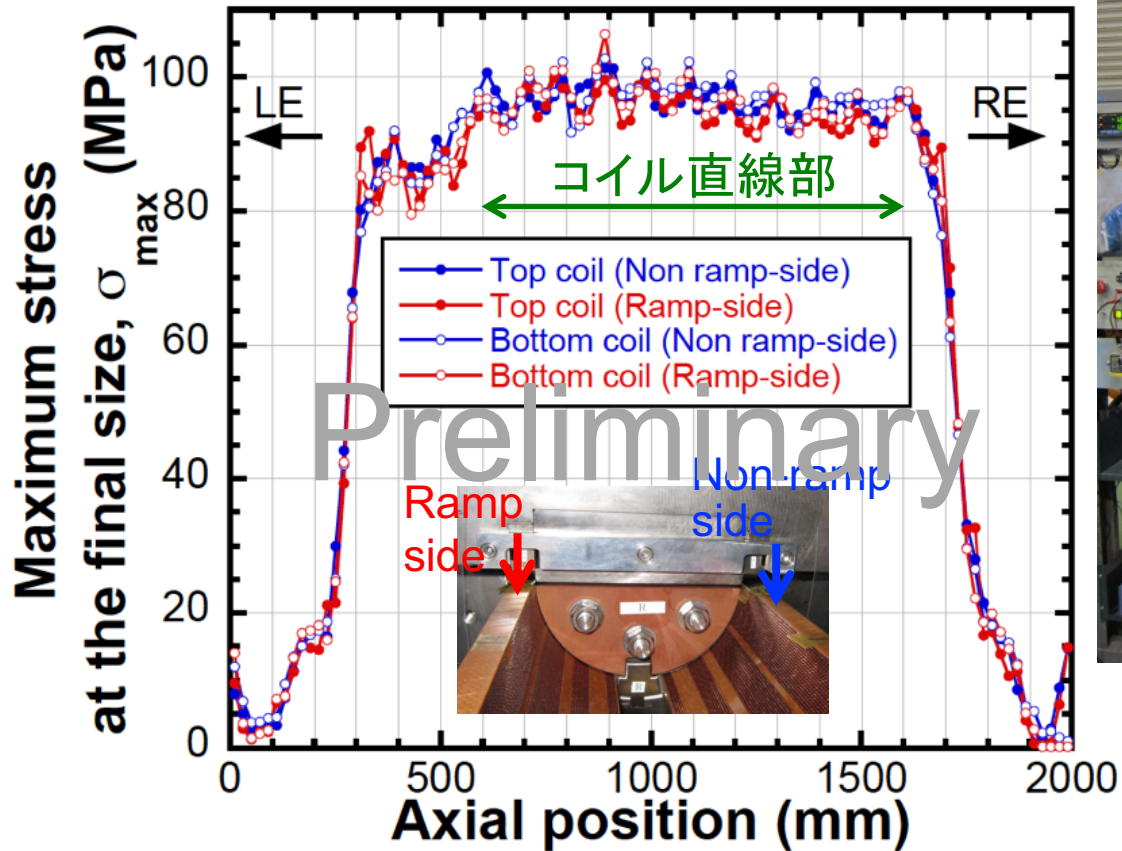
$T_1: 150^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ } シアネートエステルの硬化

$T_2: 180^\circ\text{C} \times 8\text{h}$ } (スペーサー/ケーブルの接着)

$T_3: 190\sim 205^\circ\text{C} \times 0.5\text{h} \rightarrow$ ポリイミドケーブル絶縁の自己融着
(ケーブル間の接着)

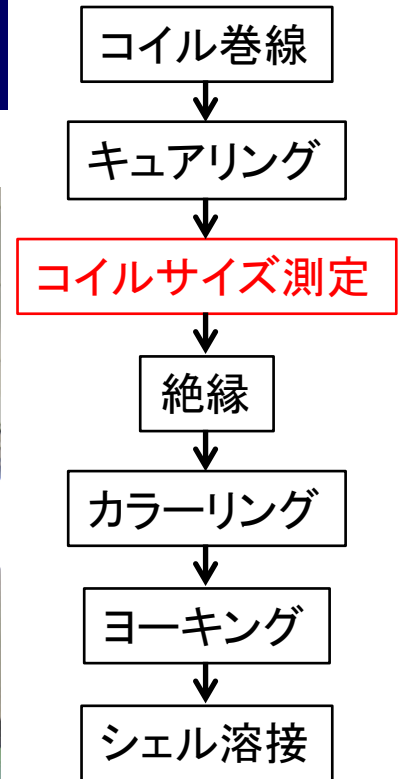
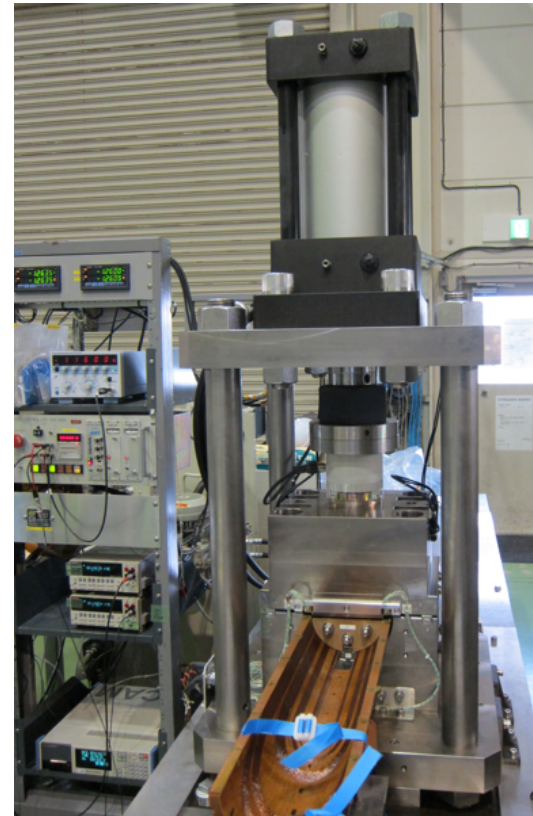
コイルサイズ測定

大きく製作したコイルを最終寸法まで圧縮するために必要な応力を測定
 → 予備応力の設計値と比較



直線部で均一な押し込み応力

Mid-planeの予備応力(104 MPa)の設計値とほぼ一致



コイル直線部での最終寸法への押し込み応力 (MPa)

	Ramp side	Non-ramp side
Top coil	95.0 ± 2.5	96.5 ± 2.2
Bottom coil	96.2 ± 3.1	97.1 ± 2.5

絶縁組み付け

- クエンチ試験用の電圧タップ巻き付け
- クエンチ保護ヒーター、対地絶縁シート4層巻き付け
- ブラッシュ（コイル保護）組み付け

電圧タップ取り付け後の
コイル



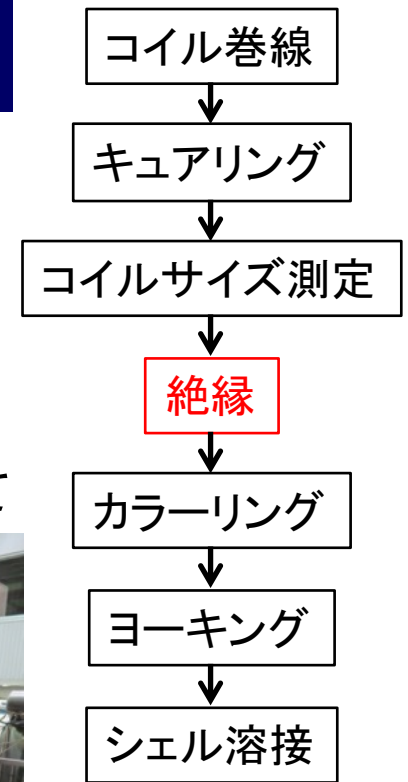
絶縁巻き付け トップ、ボトムコイル組み立て



ブラッシュ組み付け

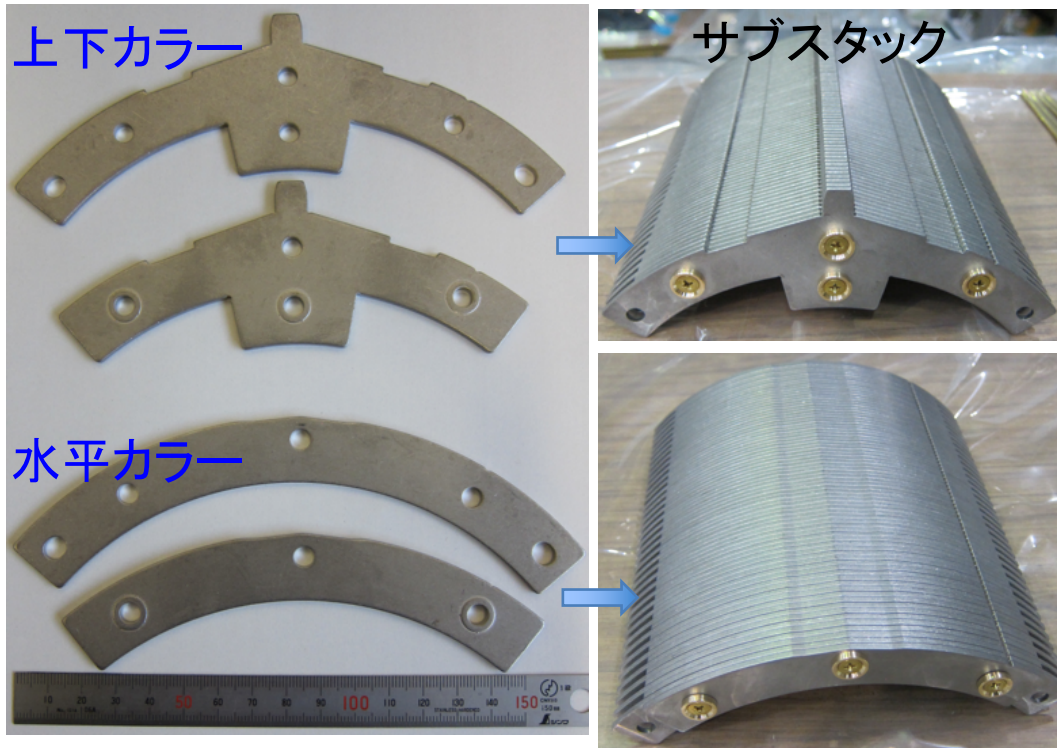


クエンチ保護ヒーター

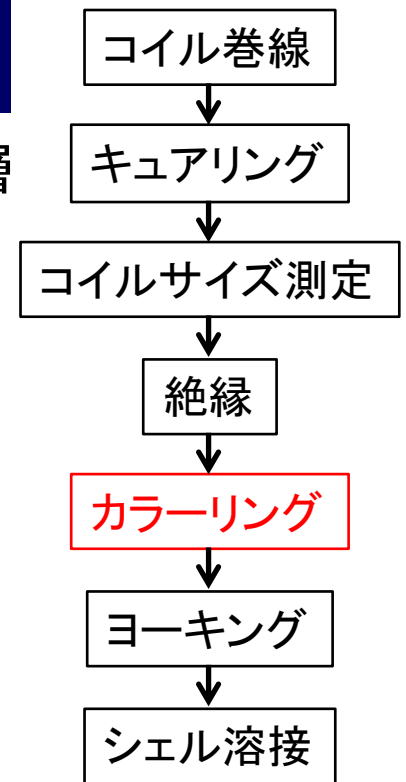
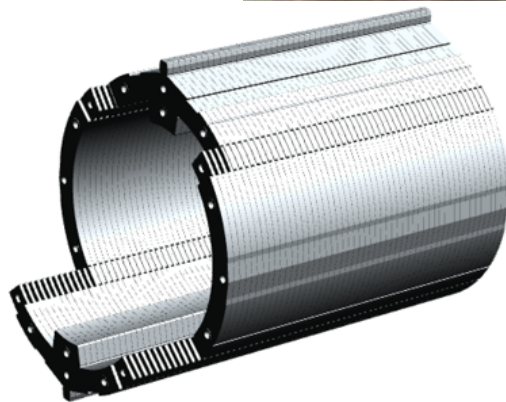


カラーリング

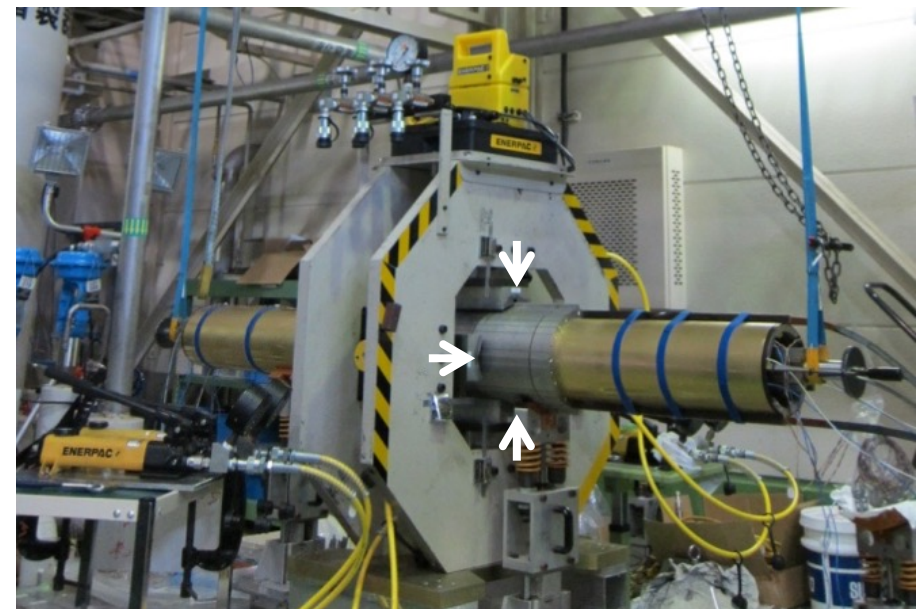
- 精密打ち抜きで製作したカラー(2.3 mm, 2.6 mm厚)を交互に積層
- 主要部分の寸法精度は $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下
- 4分割構造が問題なく組み立てできることを確認



4分割構造

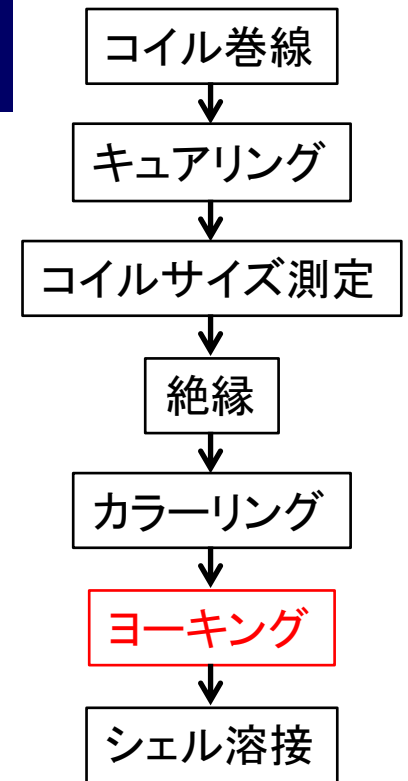
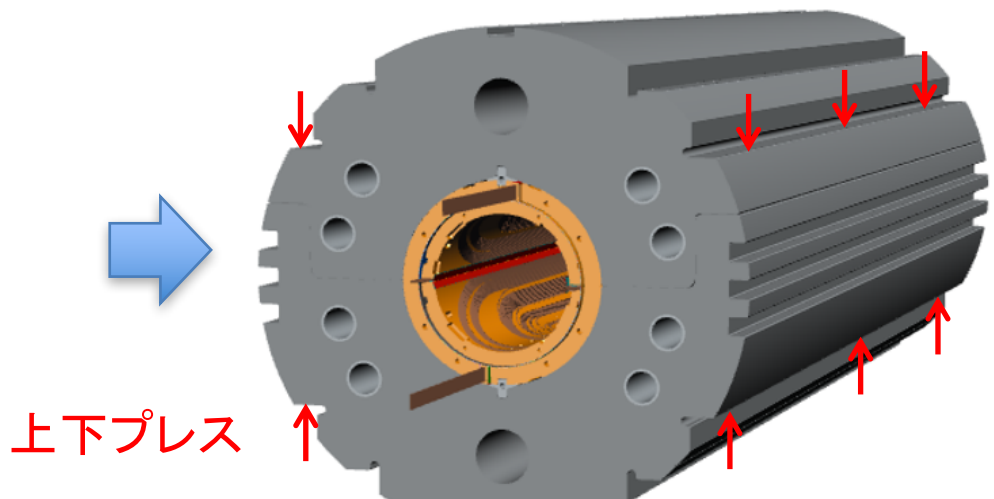
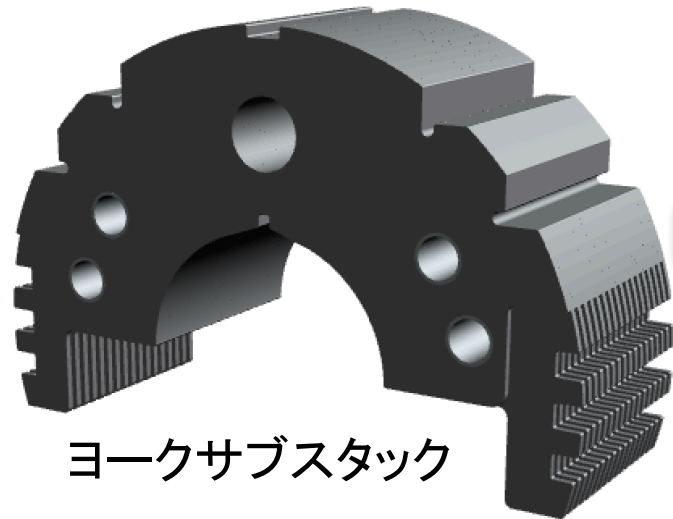


カラープレス

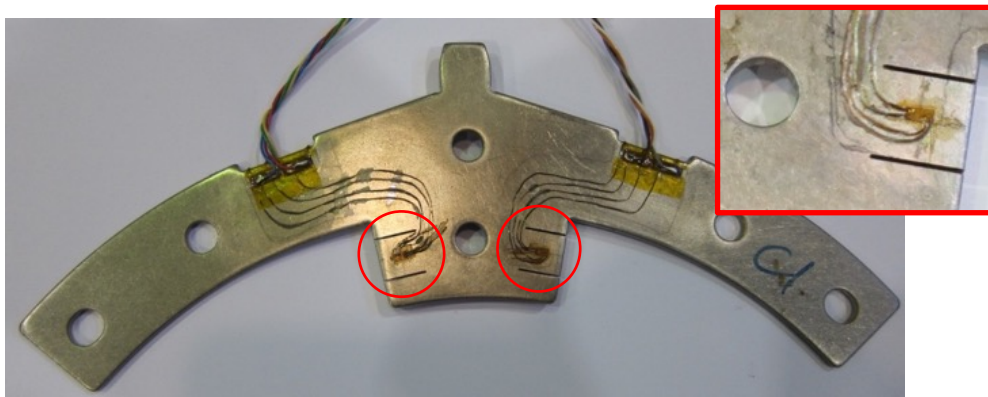


ヨークキング

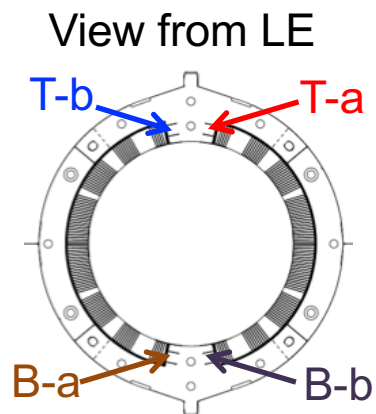
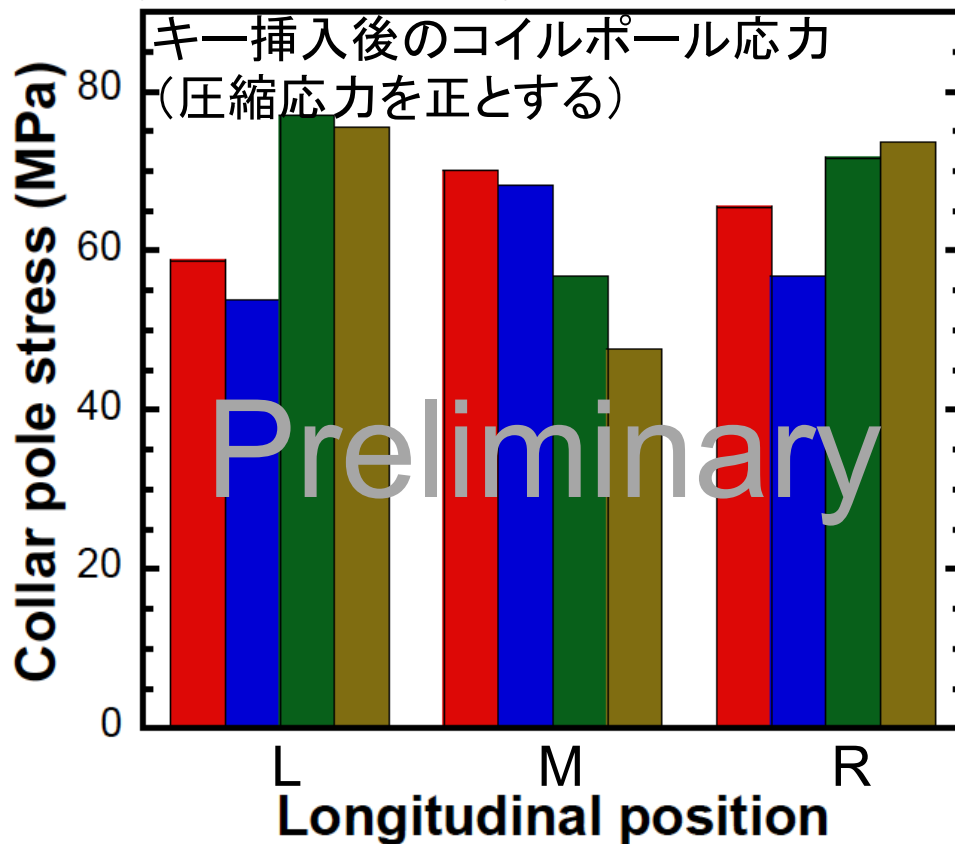
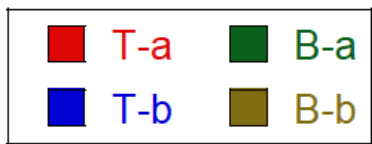
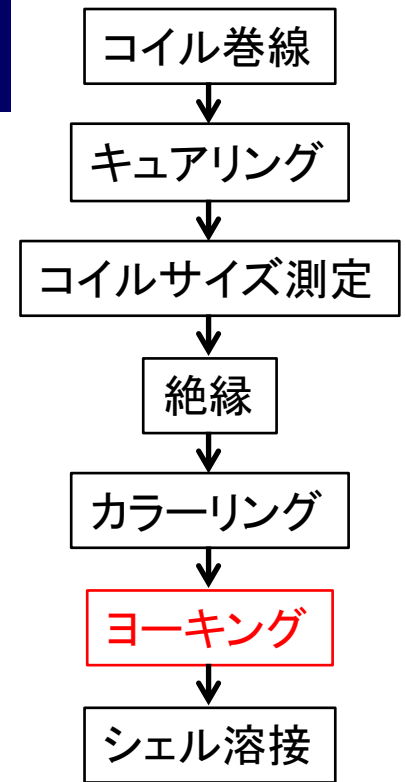
- 精密打ち抜きで製作したヨーク(5.6 mm, 6 mm厚)を交互に積層
- カラーリング後のコイルに上下からヨーク組み付け
- 上下ヨークのキー溝が揃うまでヨーク肩に荷重負荷
- キー挿入して除荷



ヨーキング後の予備応力



カラーのポール部分にひずみゲージ取り付け
→ポールターンの応力測定

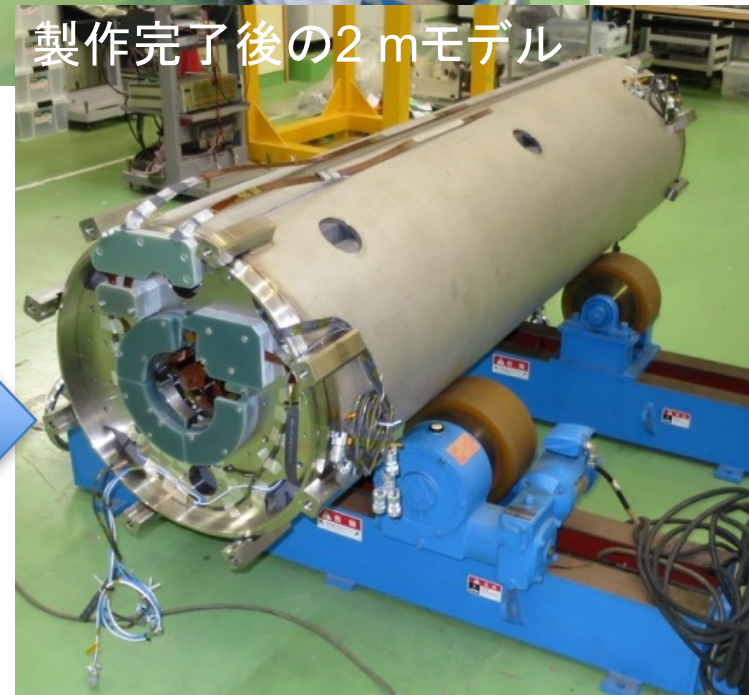
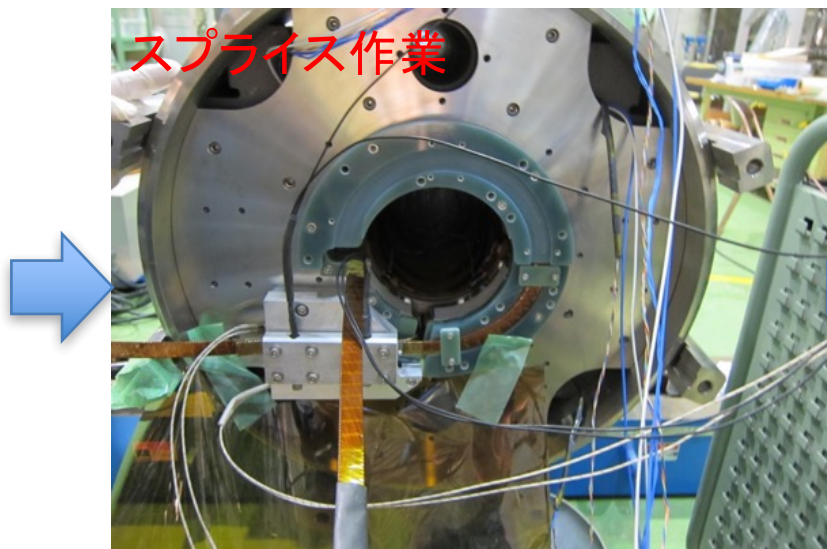
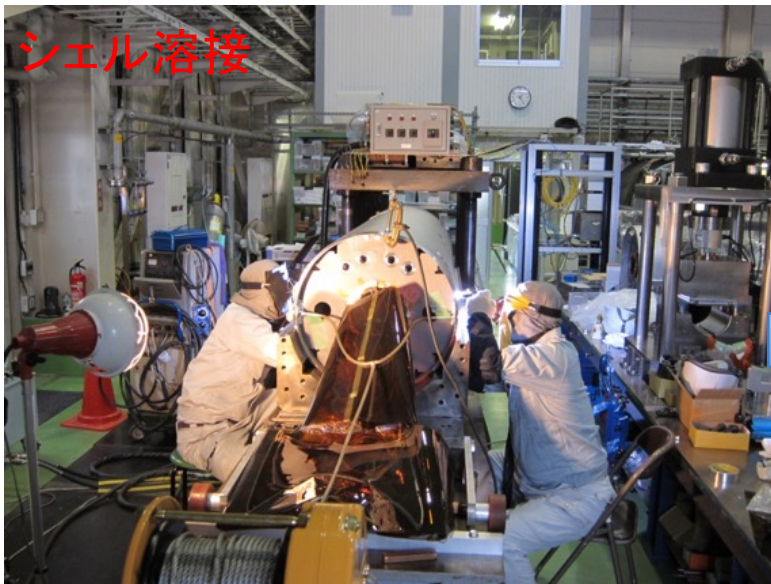
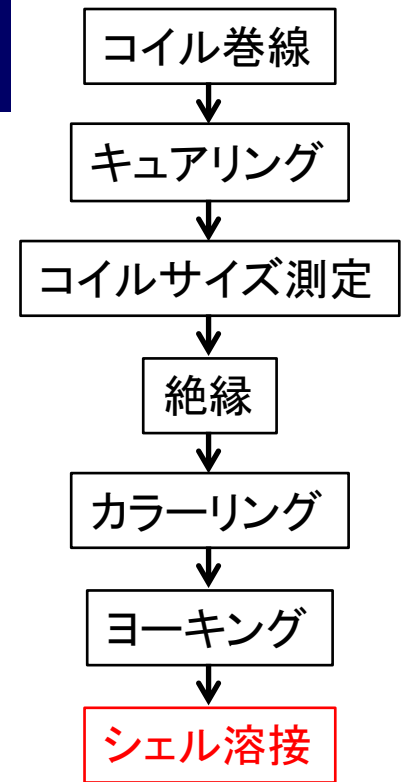


キー挿入後のコイルポール応力
長手3箇所 x 各断面4箇所 = 12箇所の平均
64.6 ± 9.6 MPa

設計値 (80 MPa) よりも低い値
→可否は冷却、励磁の結果から判断

シェル溶接

- 2 m長のハーフシェルをヨーキング後磁石に縦継ぎ溶接
- エンドリング溶接、ランプリードのスプライス作業を経て、2 mモデルの製作完了



まとめ

- CERN-LHCの高輝度アップグレード計画における日本の貢献として、大口径ビーム分離双極磁石(D1磁石)の開発を行っている。
- 鉄の飽和の影響を考慮した磁場設計を行い、コイル直線部断面のコイル配置および端部形状の最適化を行った。
- ANSYSの有限要素法計算による機械構造設計を行い、コイル予備応力の設計値を見積もった。
- KEK所内にて2 mモデル磁石の製作を行った。引き続き実施した冷却、励磁試験の結果については、次の講演で報告する。