

ITER/BA成果報告会2018

核融合炉用大型超伝導コイルを作って判った技術ポイント

Fabrication results provide progress
in large scale superconducting magnets for fusion reactor

目次

- 1 超電導(核融合・加速器)への取り組み
- 2 ITER TFコイルの構造
- 3 ITER TFコイルへの要求事項
- 4 製作プロセス
- 5 作って判った技術ポイント

※量子科学技術研究開発機構 (QST) 及びITER機構(IO)が調達するITERトロイダル磁場(TF)コイルを三菱重工業株式会社(MHI)と協力して製作しており、担当している巻線部について報告する。

超電導(核融合・加速器)への取り組み

1960	1980	1990	2000		2005		2008		2010		2018
------	------	------	------	--	------	--	------	--	------	--	------



JFT-2M (常電導)

Normal conduction

1983完



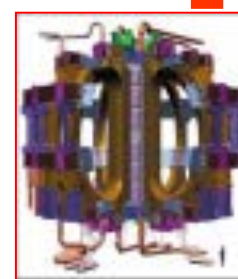
**ITER R&D
CS Insert Coil**

1999完



JT-60SA EF, CS Coil

2009.2受注



ITER TF Coil

2012.8受注



Fusion



**Muon Channel
(Univ. of Tokyo)**

1979完



**VENUS
(KEK)**

1985完



**SC Ring Cyclotron
(Riken)**

2006完



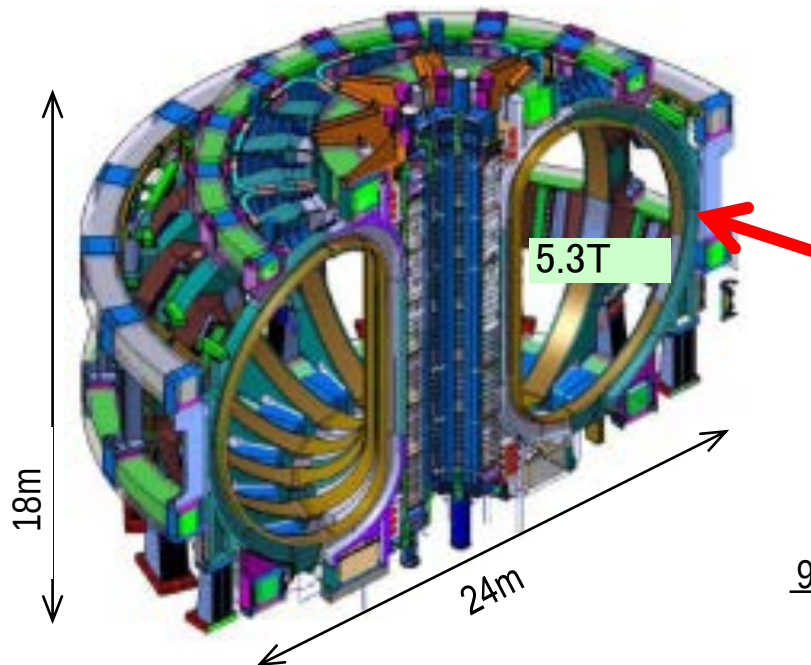
**Neutrino Beam Line
(KEK)**

2007完

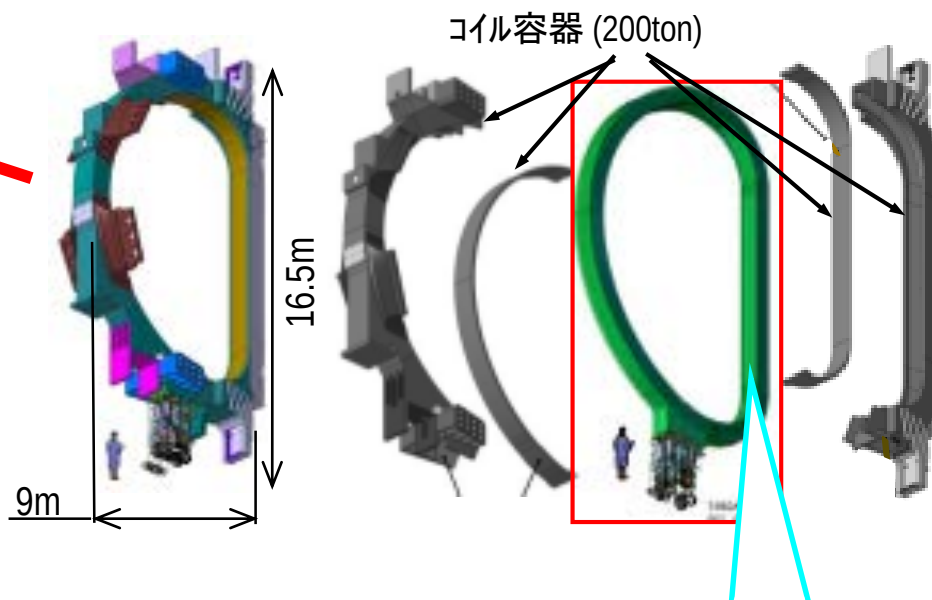
Accelerator

ITER TFコイルの構造

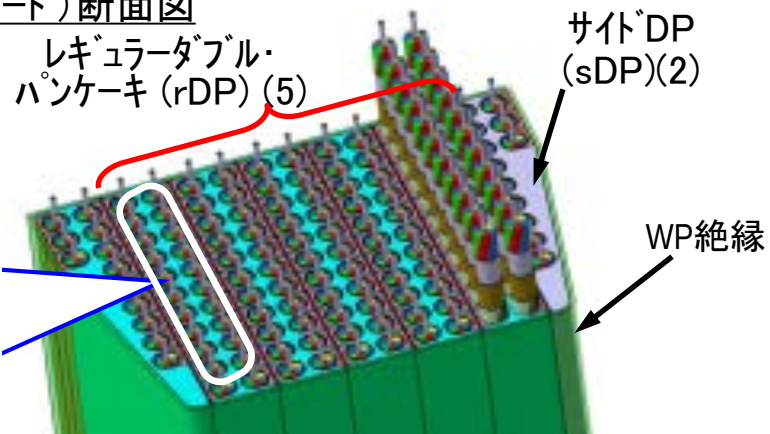
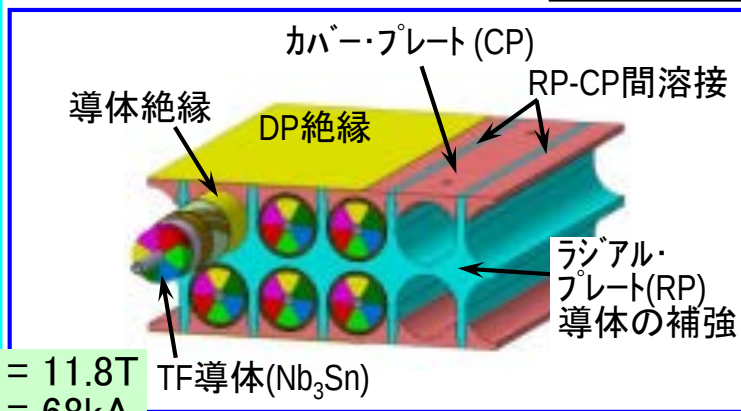
ITER マグネットシステム



トロイダル磁場(TF)コイル
(核融合炉用大型超電導コイルの一つ)



巻線部 (インボート) 断面図



定格磁場 = 11.8T
定格電流 = 68kA

ITER TFコイルへの要求事項

ITER: 核融合反応からエネルギーを取り出す

ITER TFコイルの機能と構成

強磁場

大電流

超電導 (高電流密度, 電力小)

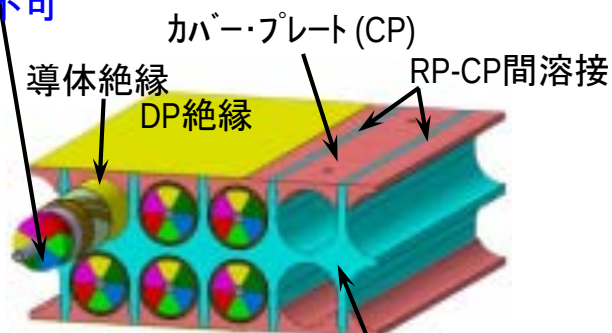
プラズマ維持のため高精度も必要

TF導体(Nb_3Sn)

定格磁場 = 11.8T
定格電流 = 68kA

- ・ 熱処理が必要
- ・ 熱処理後は0.1%以上のひずみ不可
- ・ 成形加工は熱処理前に行う

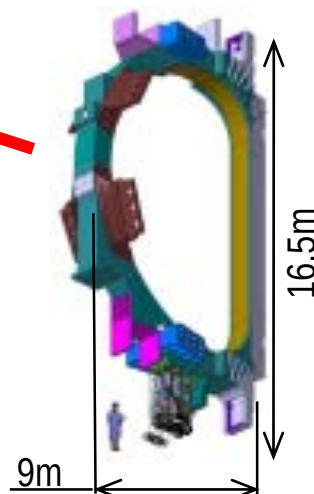
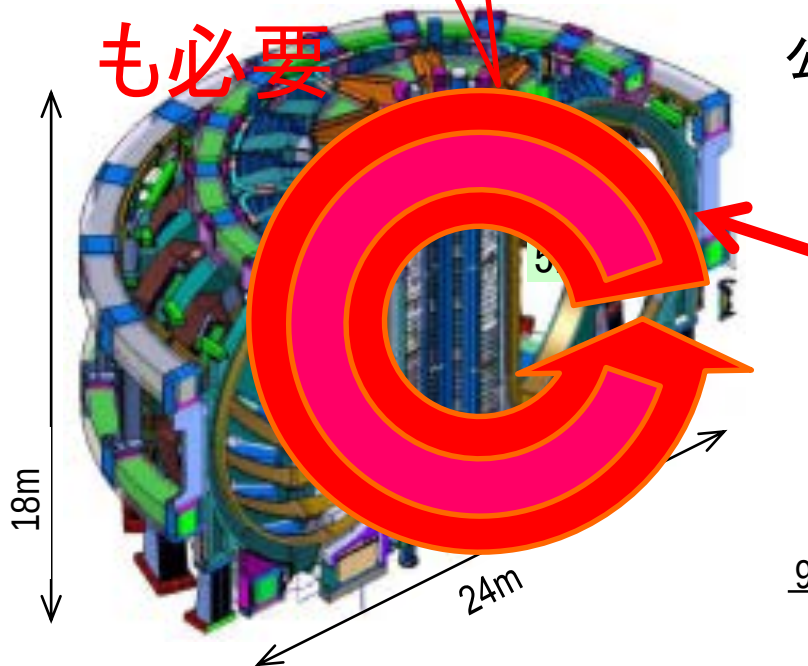
公差 ~ 数mm



大電磁力

ラジアルプレート
導体の補強

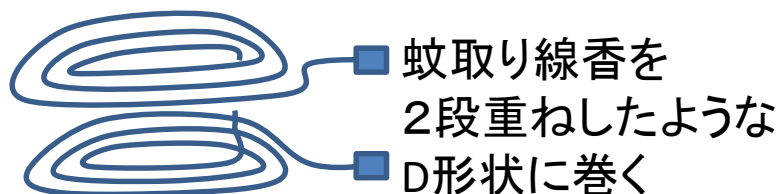
高強度



製作プロセス

導体巻線

ダブルパンケーキ(DP)巻



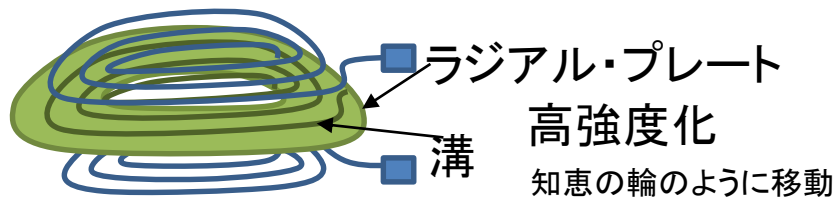
熱処理(650°C)

超電導転移する材料へ

以降, 導体への歪は0.1%以下に制限

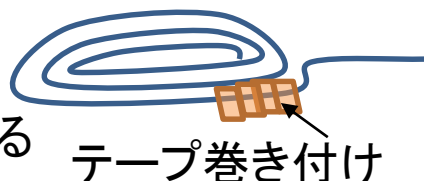
導体トランスファー

導体をラジアル・プレートにはめ込む



導体絶縁

導体を絶縁する

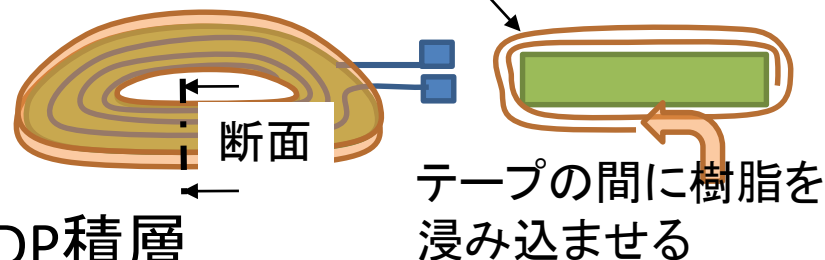


DP含浸(155°C)

導体をはめ込んだラジアル・プレートごと
絶縁・樹脂含浸・硬化

積層できる形状

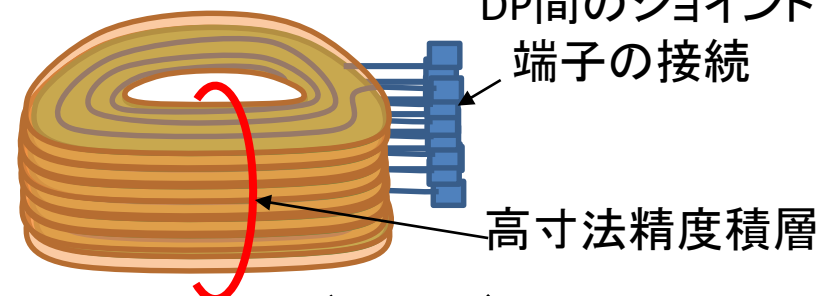
絶縁テープ巻



DP積層

7つのDPを積み重ねる

DP間のジョイント
端子の接続



WP(ワインディングバック)含浸(155°C)

積み重ねたDPごと

対地絶縁・樹脂含浸・硬化

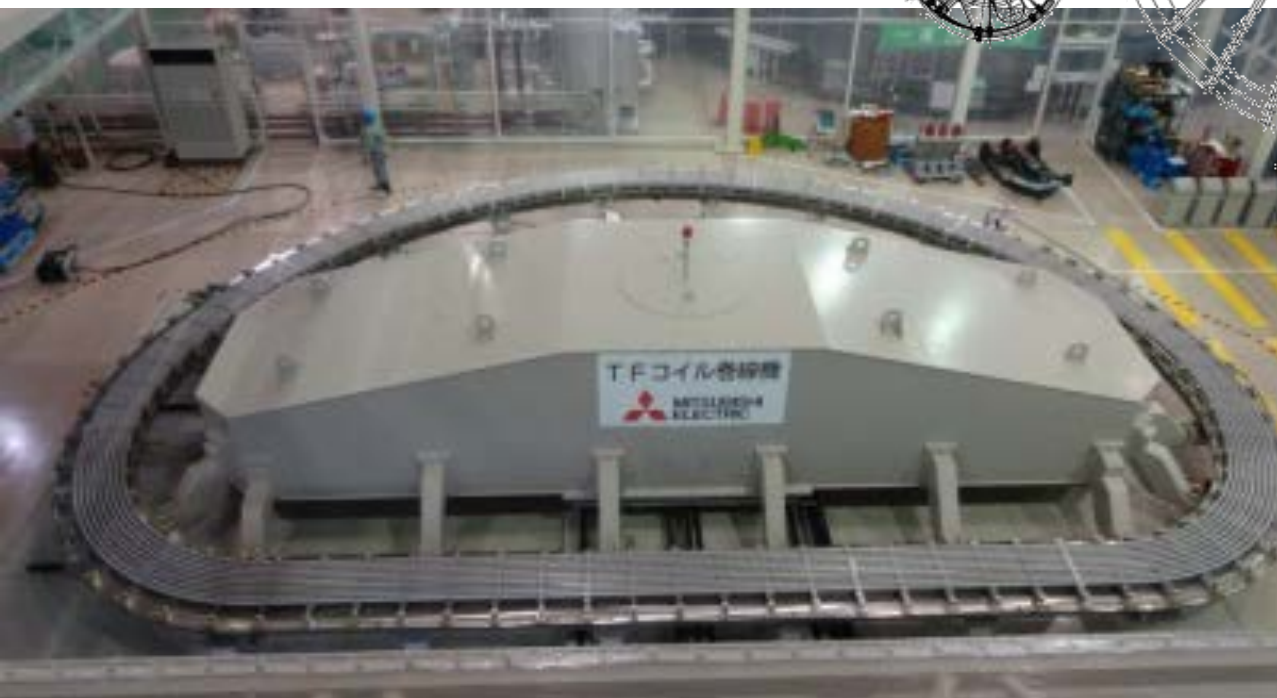
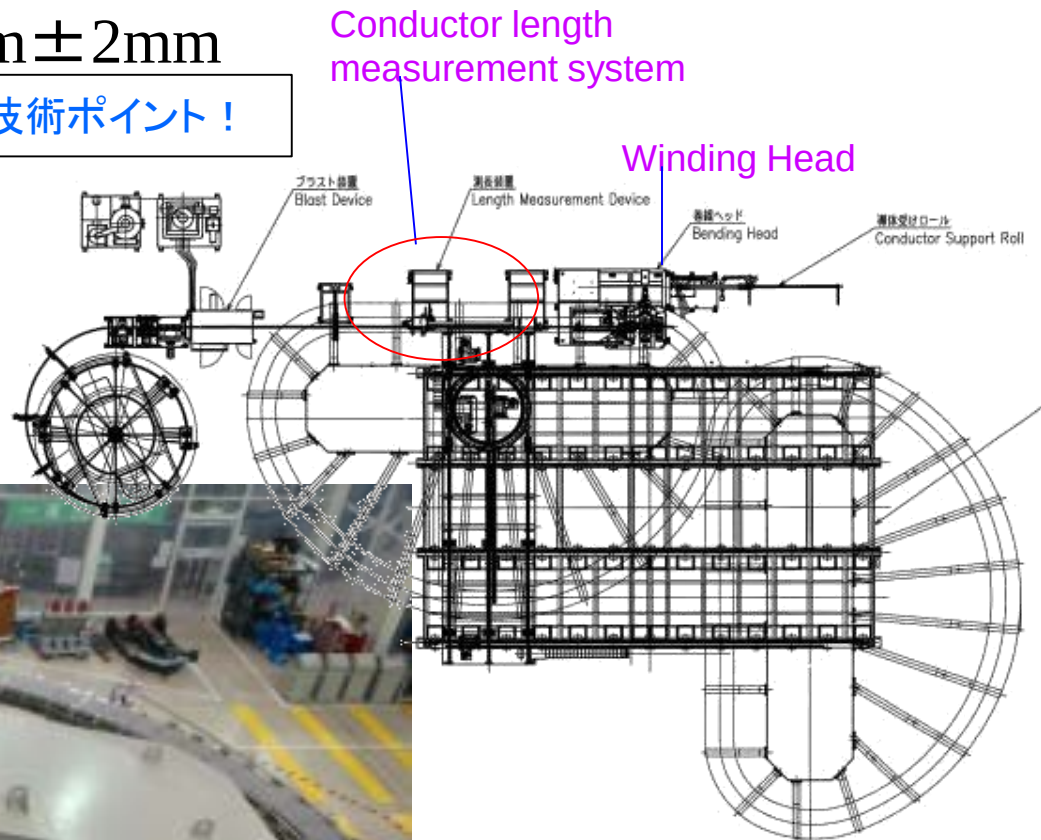
WPコールド試験(-196°C)

製作プロセス（導体巻線）

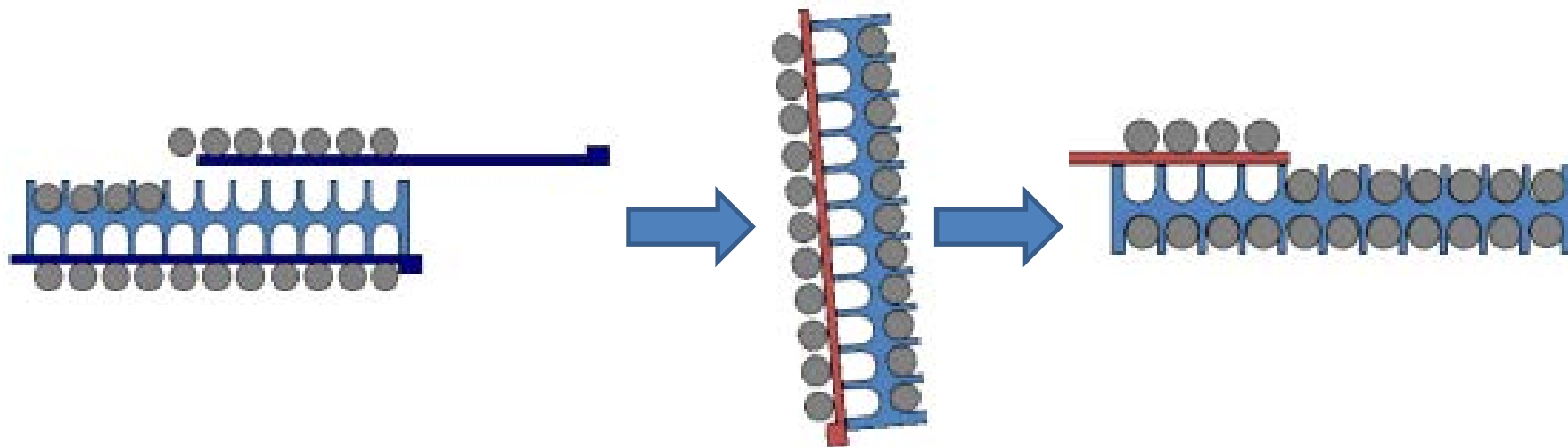
- ・巻線ヘッドで自動成形
- ・高精度巻線：周長誤差要求 $34\text{m} \pm 2\text{mm}$
（**周囲温度差** 10度のオーダ） **技術ポイント！**

溝にはめ込むため

- ・導体長測定精度：0.1mm
レーザートラッカー使用
測長システム使用



製作プロセス（導体トランスファー）



技術ポイント！

超電導線許容歪 < 0.1%
Acceptable coil distortion

上下導体の渡り部

製作プロセス（導体絶縁）



製作プロセス（DP絶縁・含浸）



Result of flatness measurement of the impregnated dummy DP.

The flatness of 2 mm was achieved. 技術ポイント！

⇒この後，7段積層

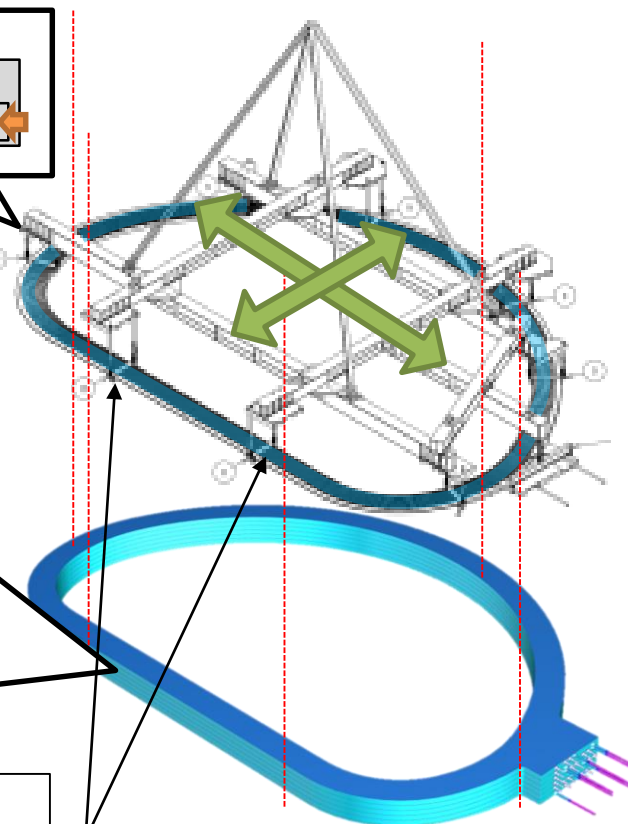
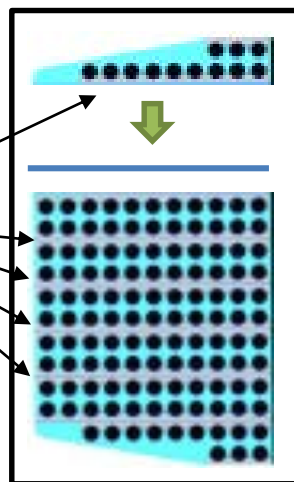
製作プロセス (DP積層)

完成したDPを7段積層する

摩擦力を用いた吊治具

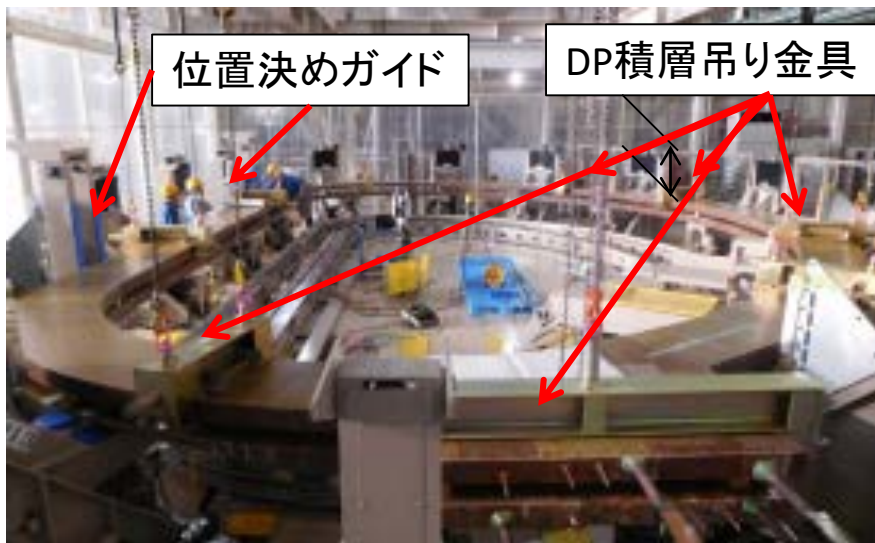


DP積層 隙間無し
下から支持できない



技術ポイント！

吊り点高さレベル10mm以下で
ハンドリング
厚さ120mmでも曲がる



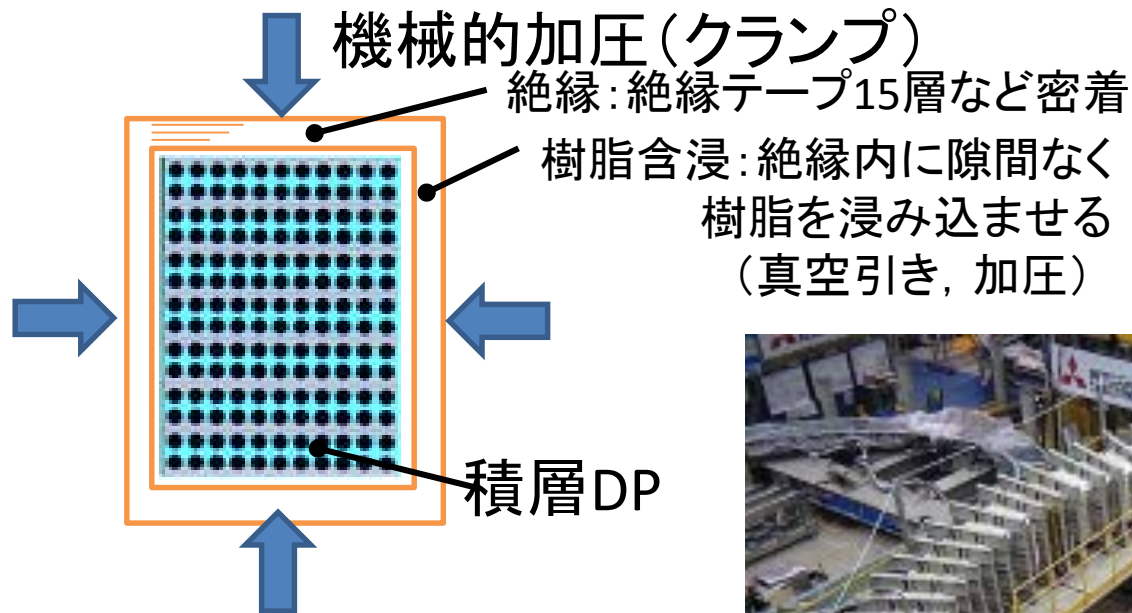
位置決めガイド

DP積層吊り金具

0.1mm単位での積層位置制御

製作プロセス (WP含浸)

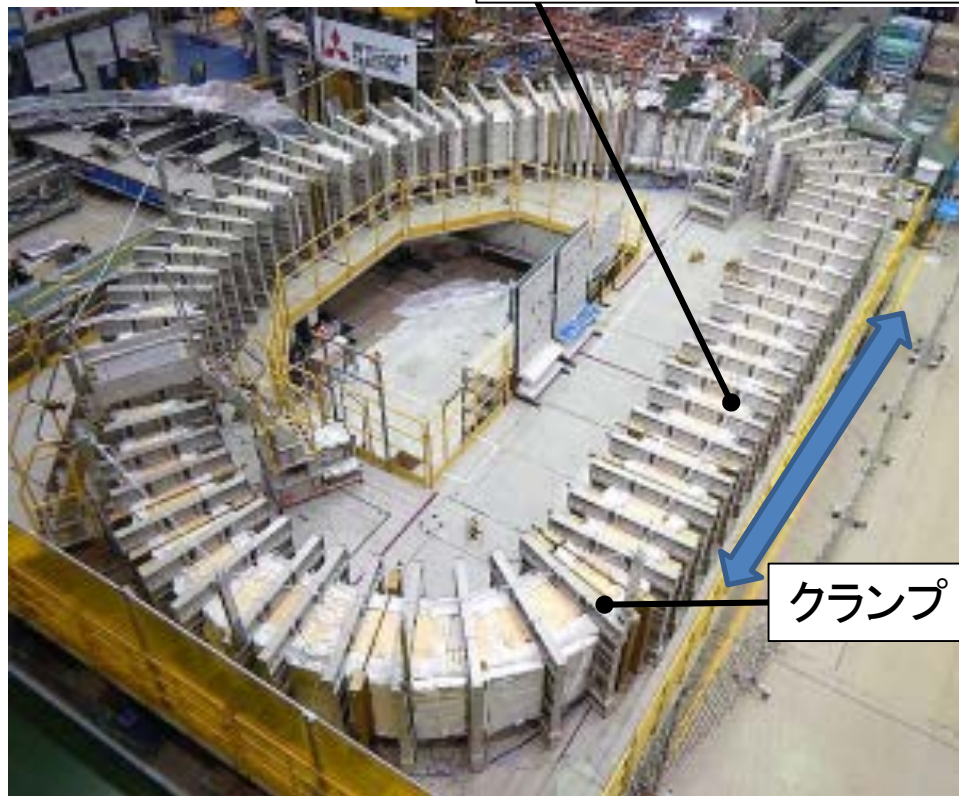
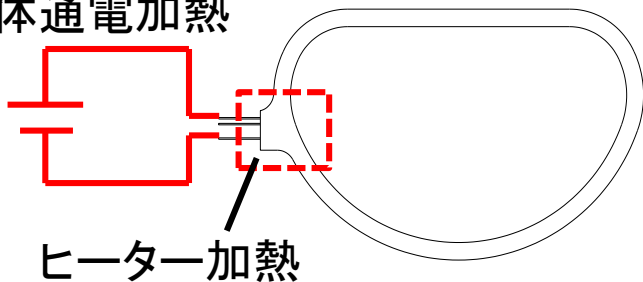
クランプで加圧⇒外形寸法高精度成形(±3mm)・絶縁強度確保



技術ポイント!

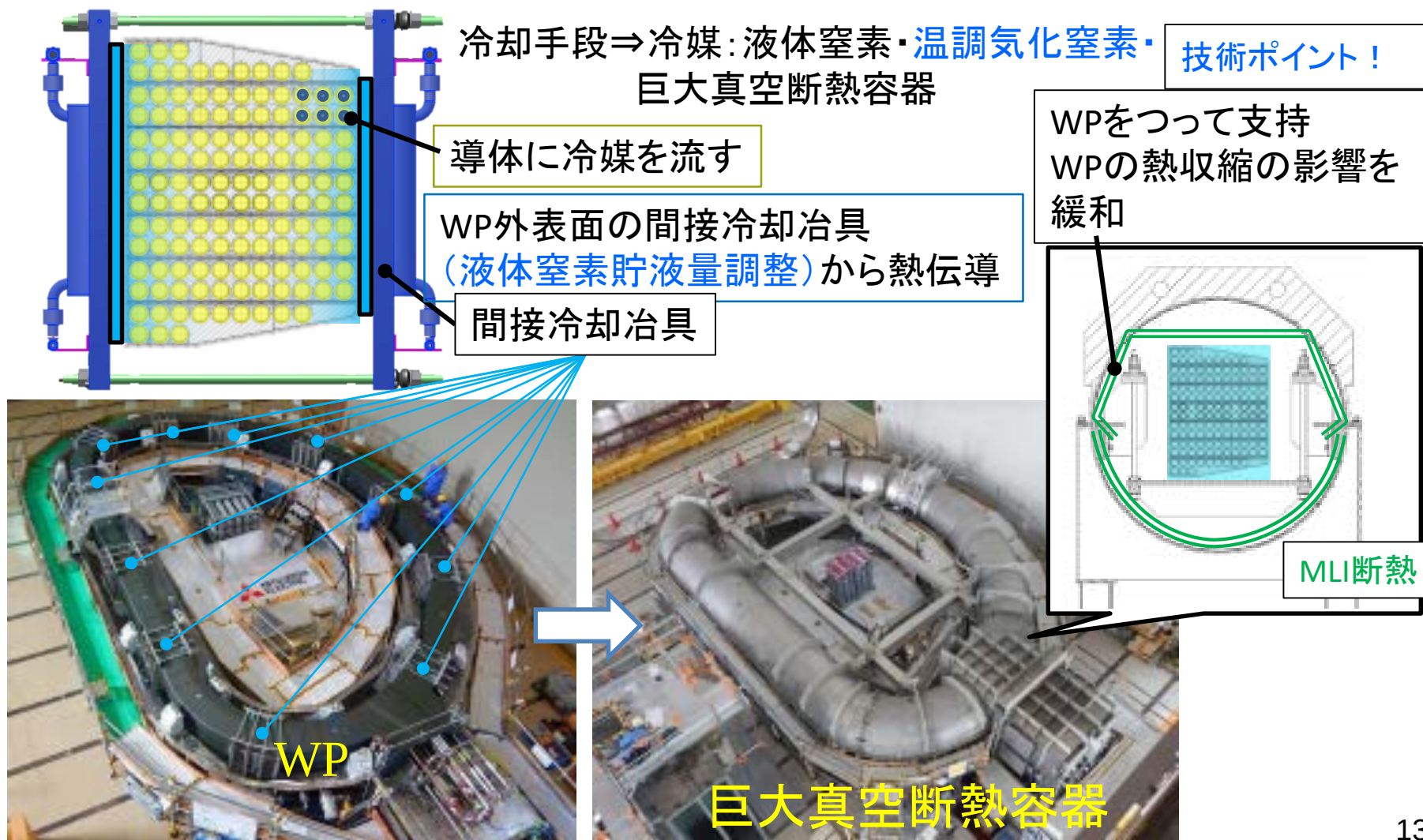
含浸容器
熱膨張の影響
架台の上でスライド

硬化プロセスの温度管理
(温度ばらつき小 (155^{+5}_{-10} °C))
導体通電加熱

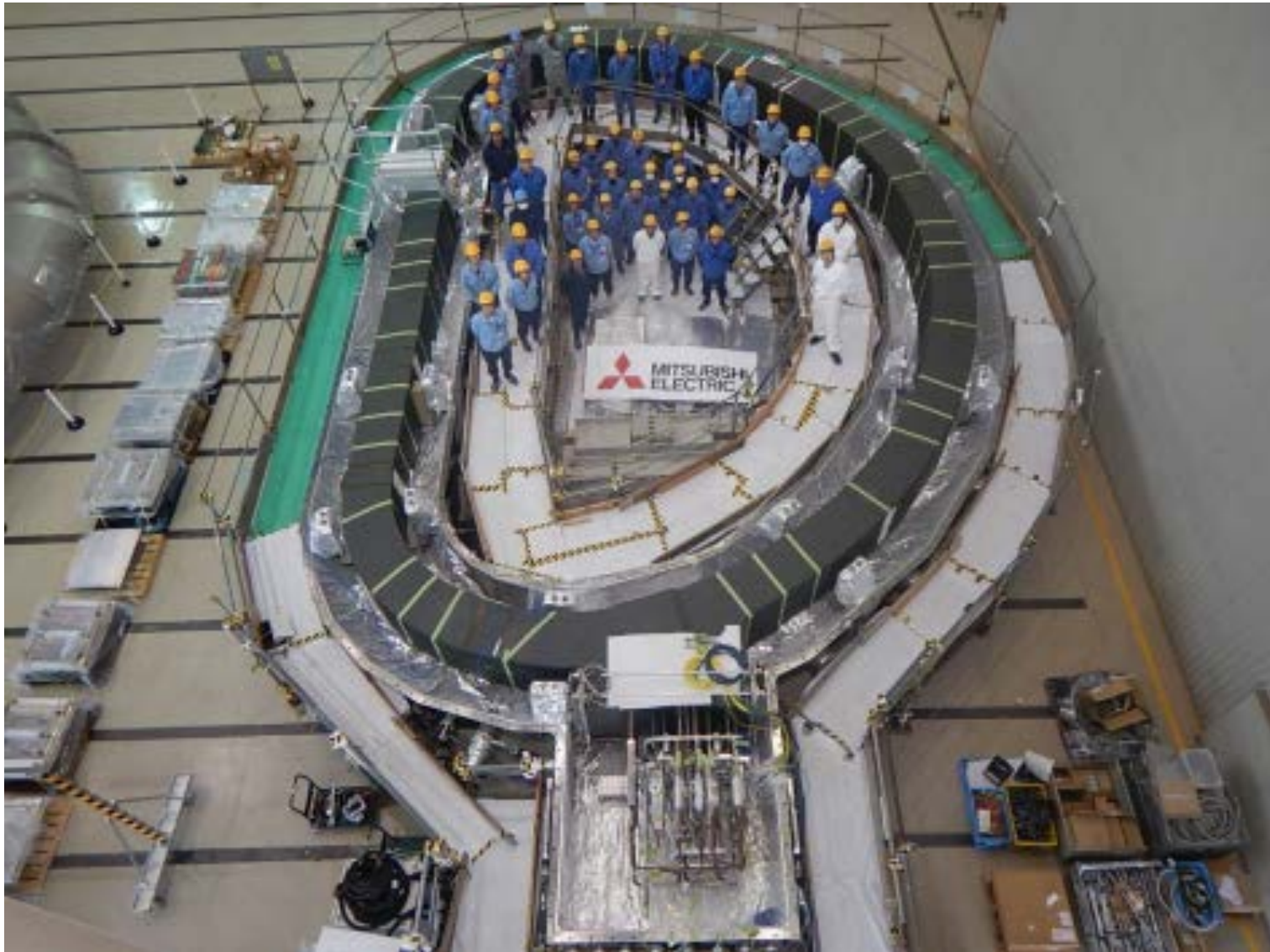


製作プロセス（コールド試験）

WP (100t) を -196°C (液体窒素温度) レベルまで冷却 温度ばらつき小 (50K)
冷却期間: 24日



製作プロセス（初号機組立完了）



製作して判った技術ポイント

超電導コイルが大型であるため

- ・温度による寸法変化の影響を考慮した工法確立

例：高寸法精度測定

⇒環境温度管理

各プロセスの熱膨張，熱収縮

⇒TFコイル巻線部と治具との位置ずれ管理

位置ずれ緩和構造

- ・歪を考慮した工法確立

例：重力による変形

⇒吊り治具の設計，たわみ量管理

