

# 大型超伝導コイルの製作

小泉 徳潔

超伝導コイル開発グループ

量研機構

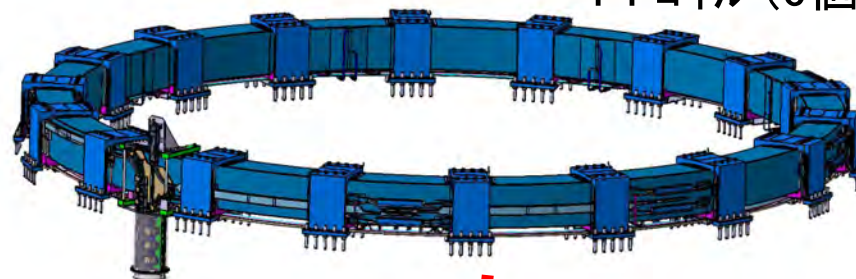
第33回 プラズマ・核融合学会 年会  
シンポジウム4 核融合炉用超伝導コイル設計

2016.12.2 東北大学青葉山キャンパス

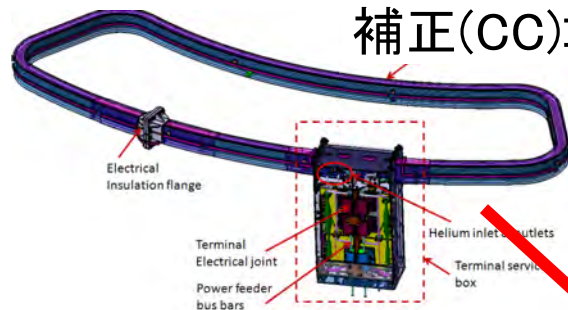
## 目次

1. ITER TFコイル及び導体の紹介
2. ITER TFコイルの製作
3. まとめ

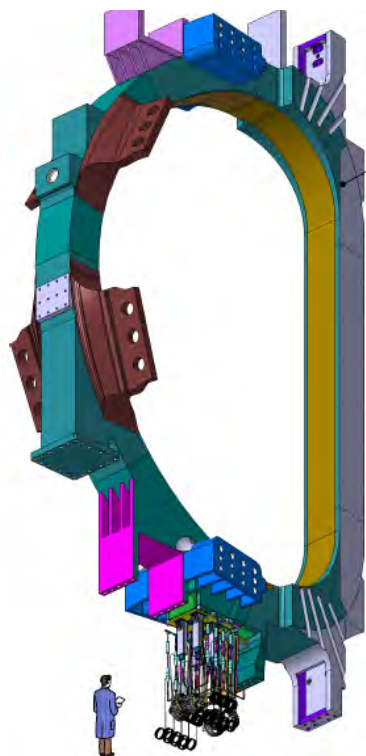
PFコイル (6個)



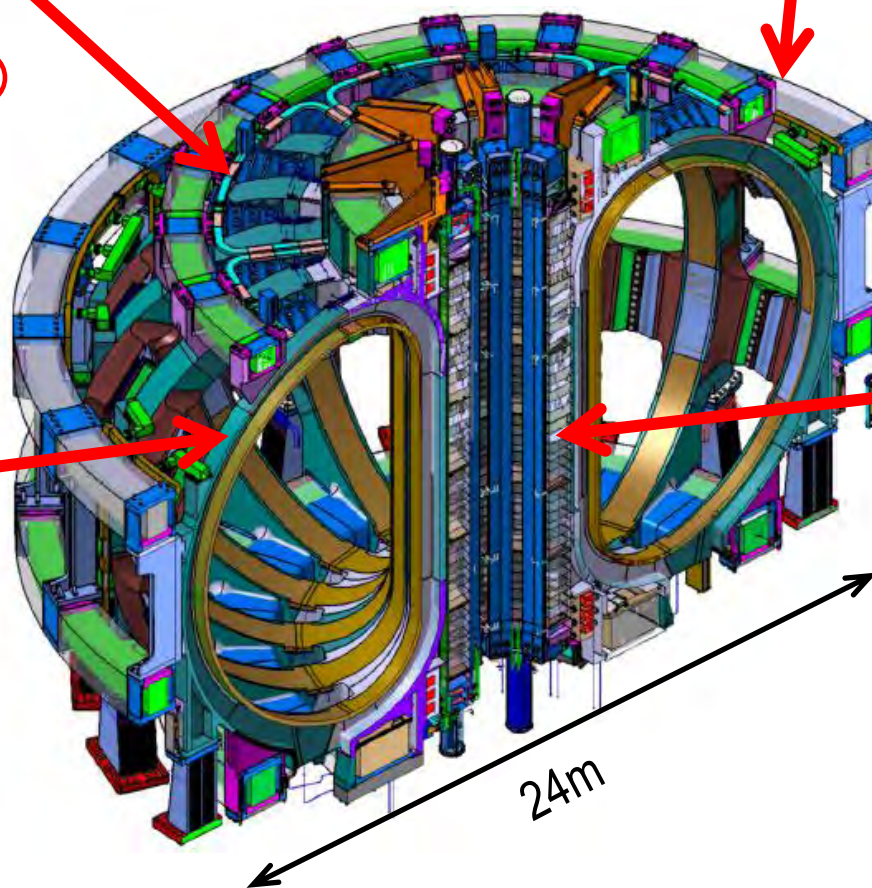
補正(CC)コイル(18個)



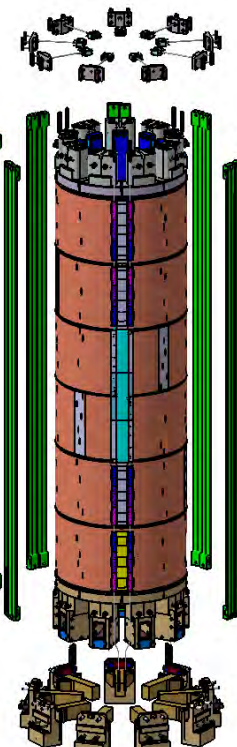
トロイダル磁場(TF)コイル(18個)



18m

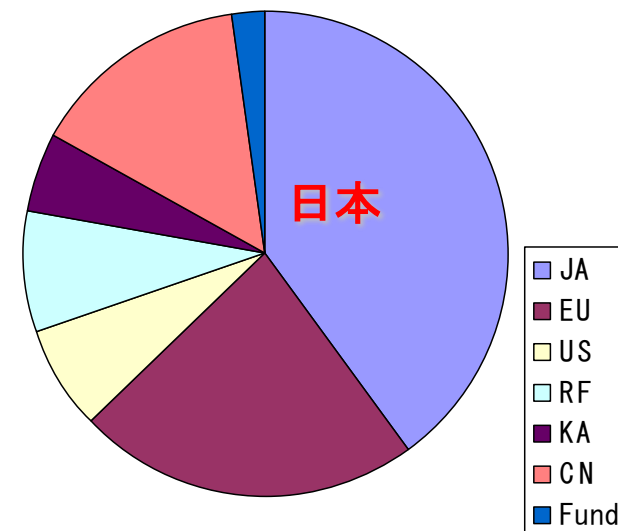


24m



CSコイル  
(6モジュール)

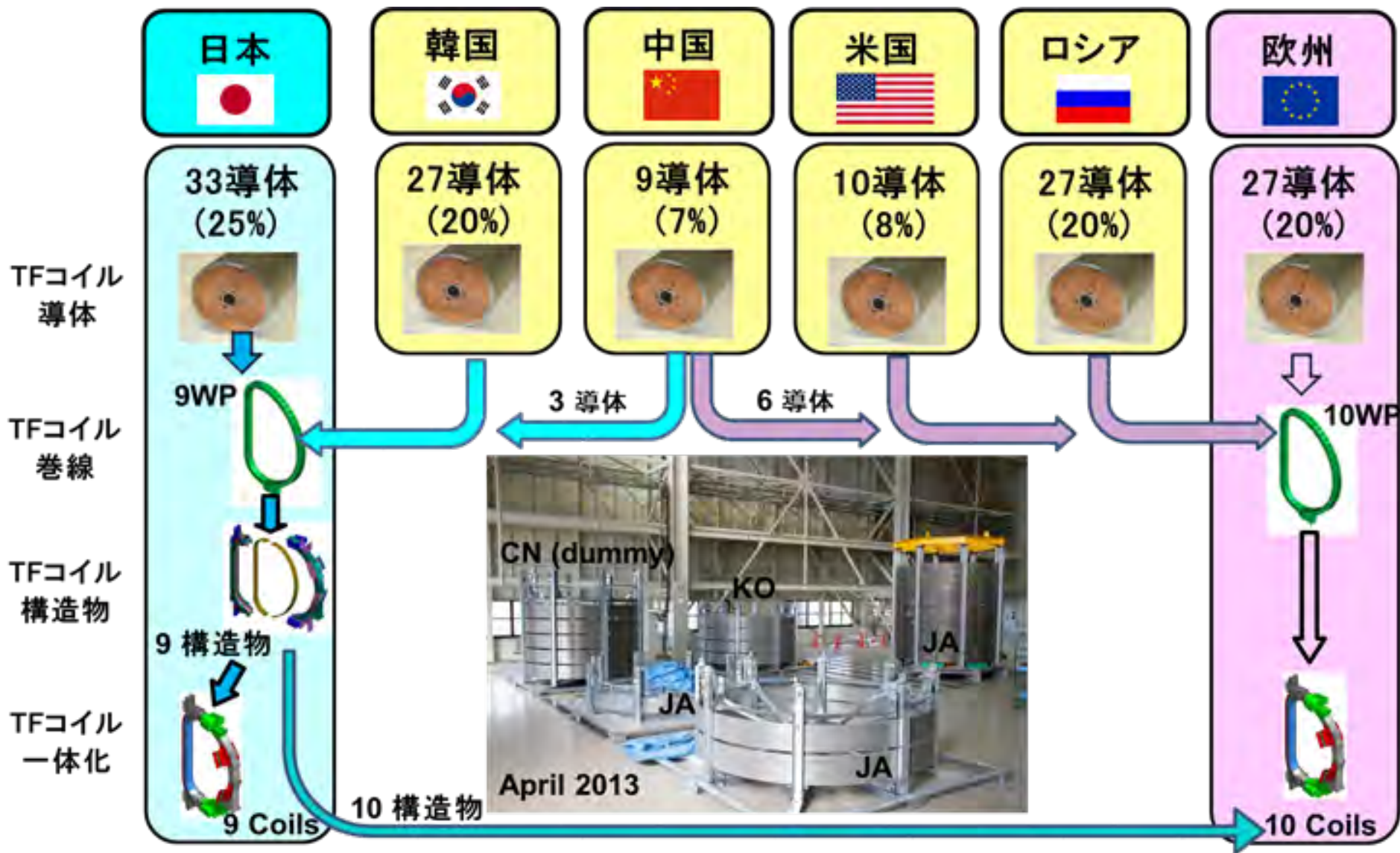
| 項目    | ITER<br>機構 | 中国   | EU  | 韓国  | 日本   | ロシア | 米国 |
|-------|------------|------|-----|-----|------|-----|----|
| TF導体  |            | 7%   | 20% | 20% | 25%  | 20% | 8% |
| TFコイル |            |      | 10個 |     | 9個   |     |    |
| TF構造物 |            |      |     |     | 100% |     |    |
| CS導体  |            |      |     |     | 100% |     |    |
| CSコイル |            |      |     |     |      |     | 7個 |
| PF導体  |            | 65%  | 21% |     |      | 14% |    |
| PFコイル |            |      | 5個  |     |      | 1個  |    |
| 補正コイル |            | 18個  |     |     |      |     |    |
| フィーダー |            | 100% |     |     |      |     |    |
| 計測素子  | 100%       |      |     |     |      |     |    |



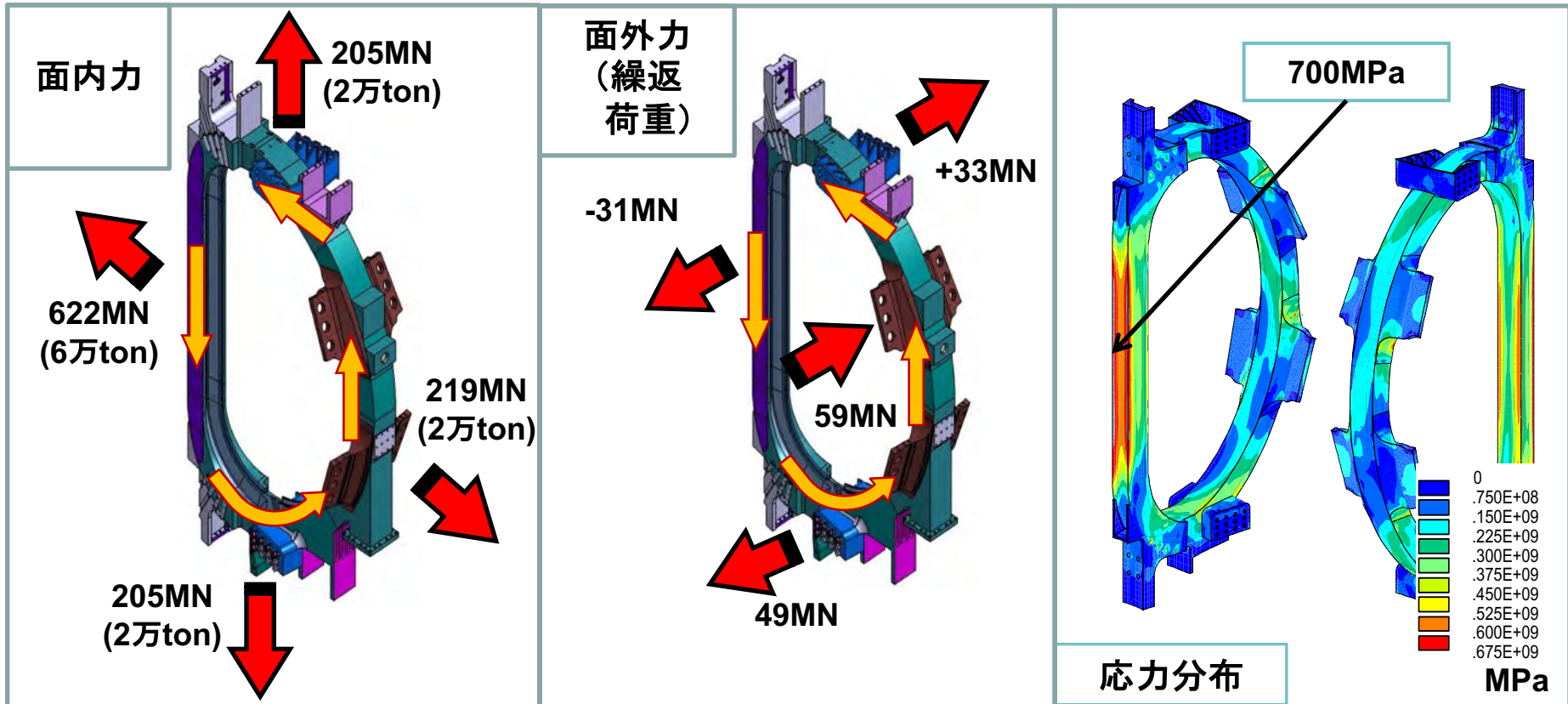
各極の貢献度

□ 日本では、TF導体の製作を完了させ、今まさに、TFコイルの製作を進めている。

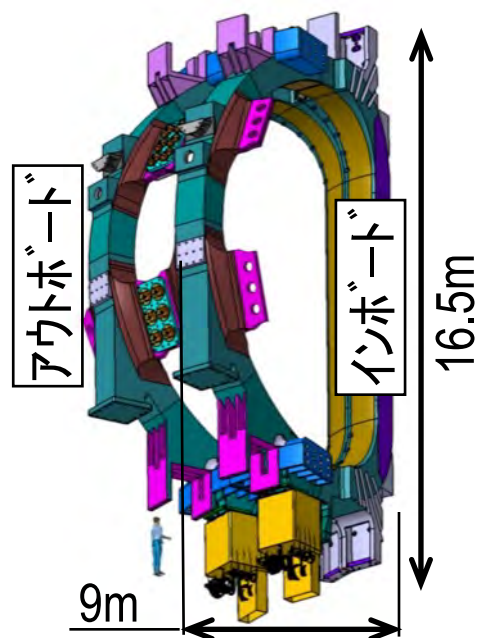
# ITER TF導体の国際調達分担



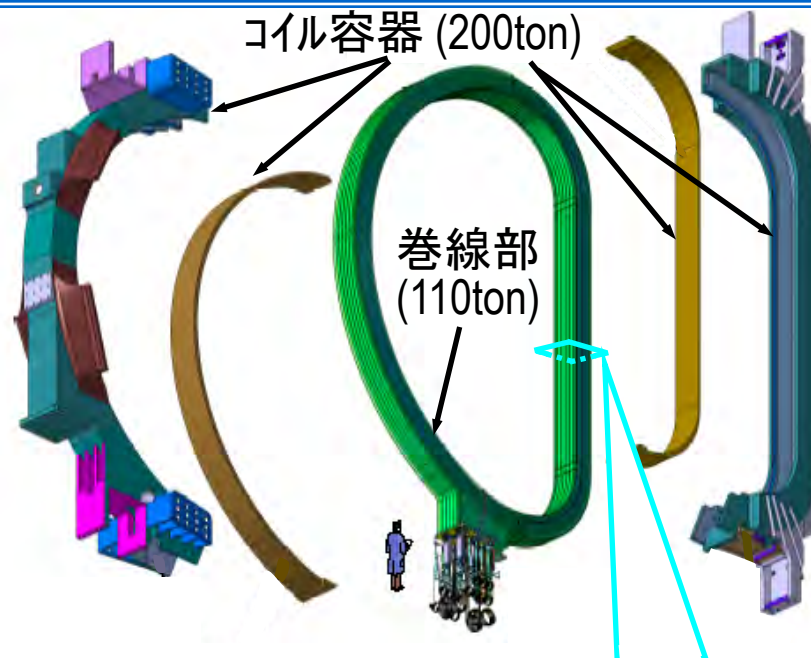
# TFコイルに働く巨大な力



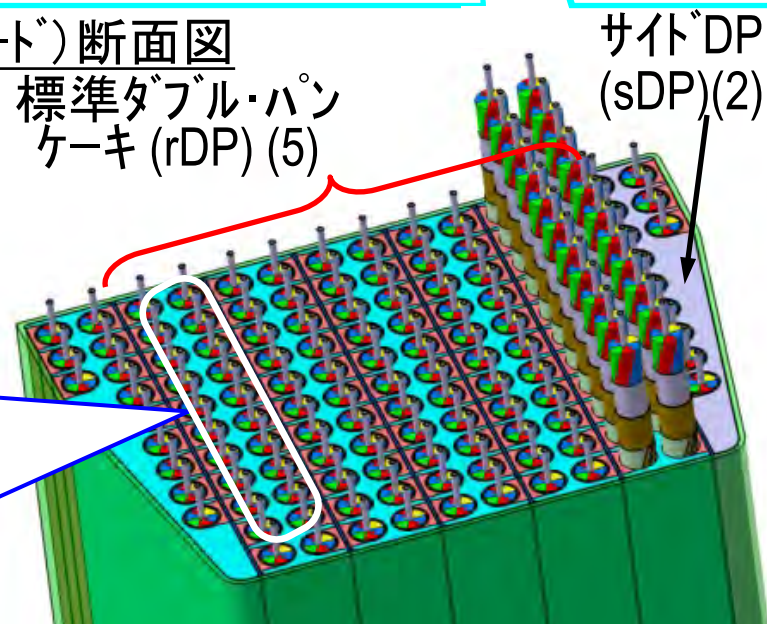
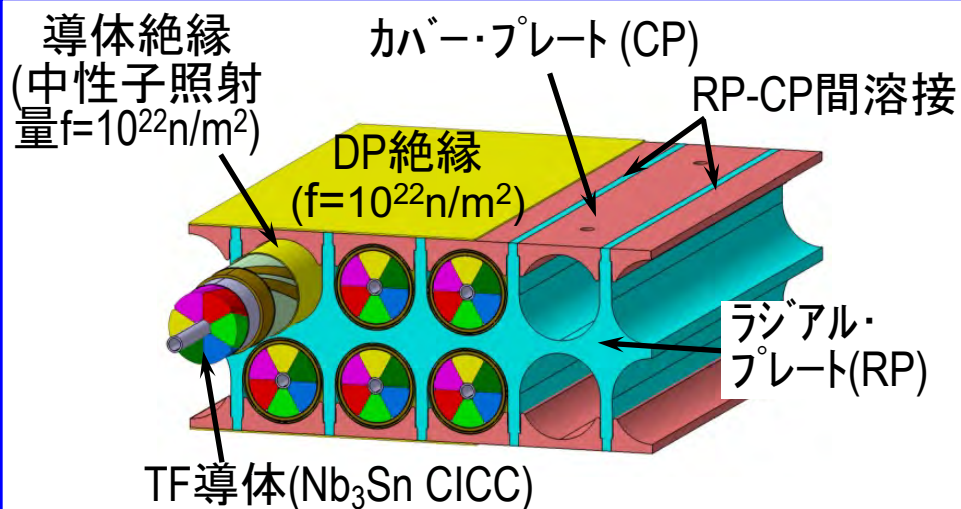
# ITER TFコイルの構造



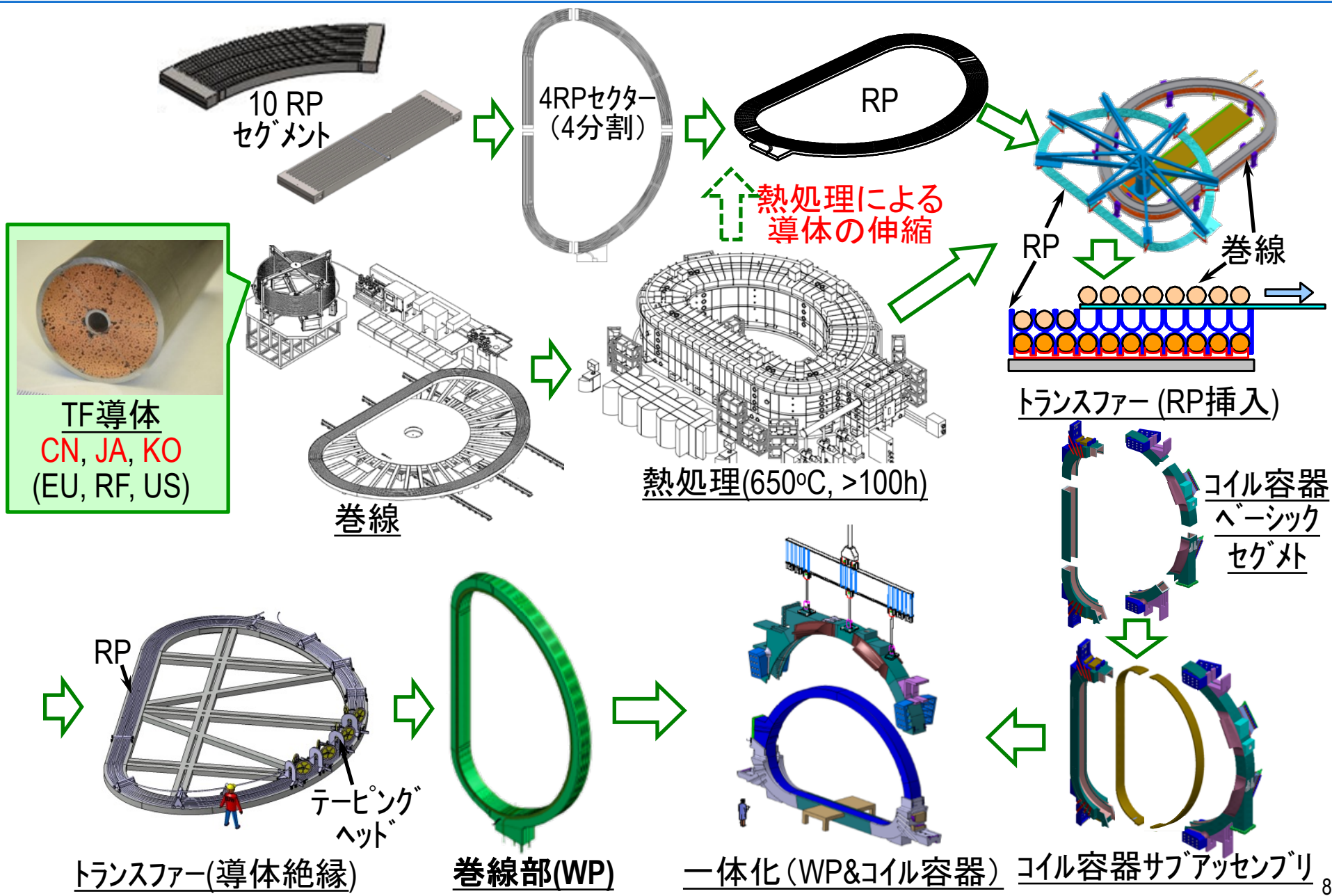
定格磁場  
= 11.8T  
定格電流  
= 68kA



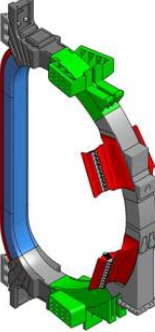
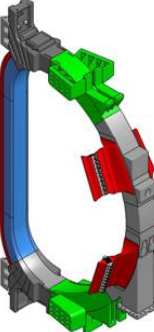
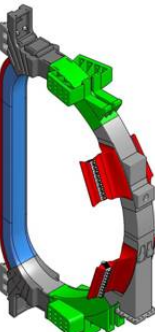
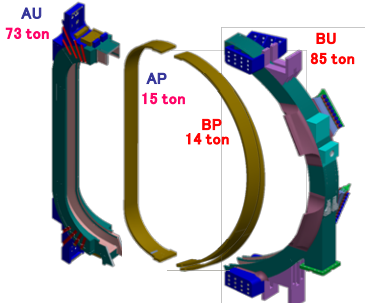
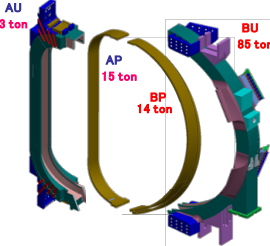
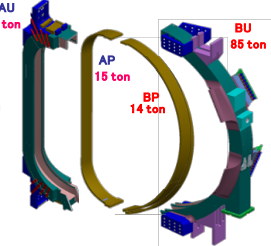
## 巻線部（インポート）断面図



# ITER TFコイルの製作方法



# TFコイル及び構造物の調達スキーム

|               | 2012年度の契約                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2013年度の契約                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TFコイル         |  <p>ダミーDP</p>  <p>TFコイル<br/>初号機</p> <p>2012年8月<br/>契約締結<br/>(三菱重工)</p>  <p>巻線部2個</p> <p>2013年<br/>3月契約<br/>締結<br/>(東芝)</p> |  <p>TFコイル4機</p> <p>2013年度7月及び3月契約<br/>(4機:三菱重工, 4機:東芝)</p>  <p>TFコイル4機</p> |
| TF コイル<br>構造物 |  <p>TFコイル構造物初号機</p> <p>2012年8月契約締結(現代重工)</p> <p>構造物材料<br/>(5セット)</p>                                                                                                                                     |  <p>構造物3機分</p> <p>2013年度7月及び3月契約<br/>(3機:現代重工, 6機:東芝)</p>  <p>構造物6機</p>  |

# 技術課題の例(トランスファー)

- ❑ 導体長が超電導熱処理で変化.
- ❑ 熱処理後の導体をRP溝に挿入する必要あり.

❑ 熱処理後の導体長とRP溝の許容公差 = 数 mm / 高さ14m x 幅9m.  
**≈0.02%の導体長公差**

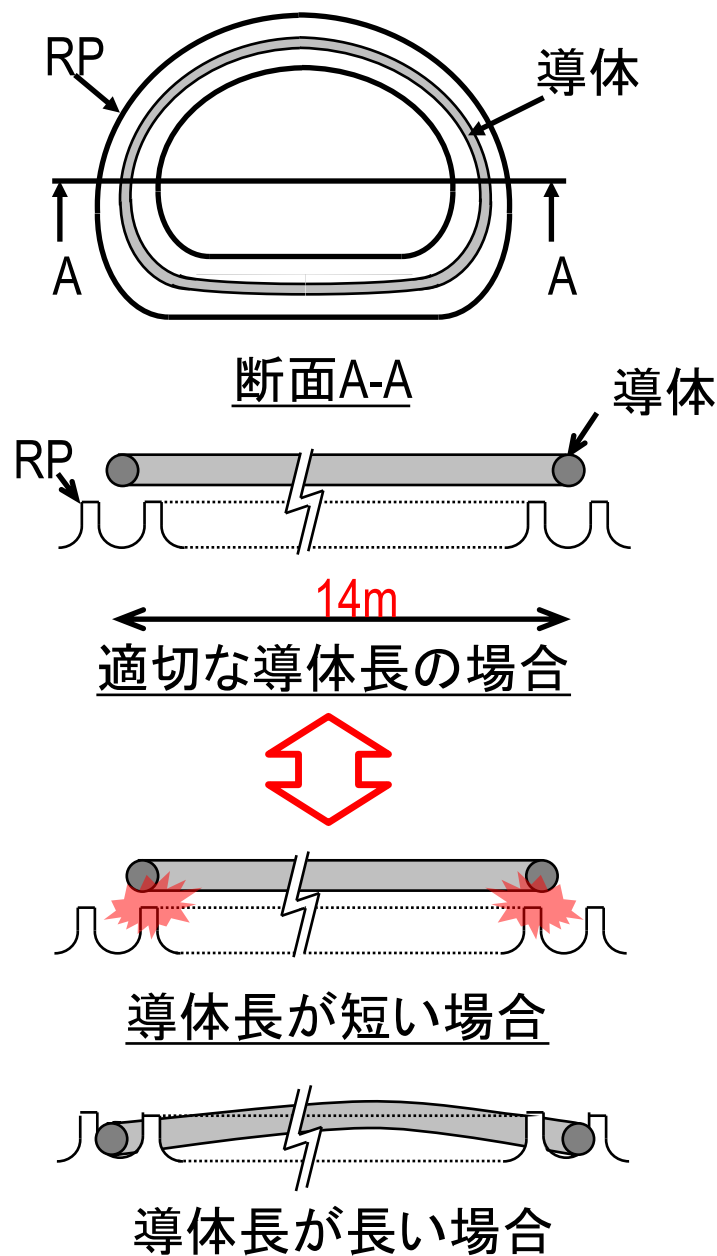
↓

## 試作結果からの予想公差

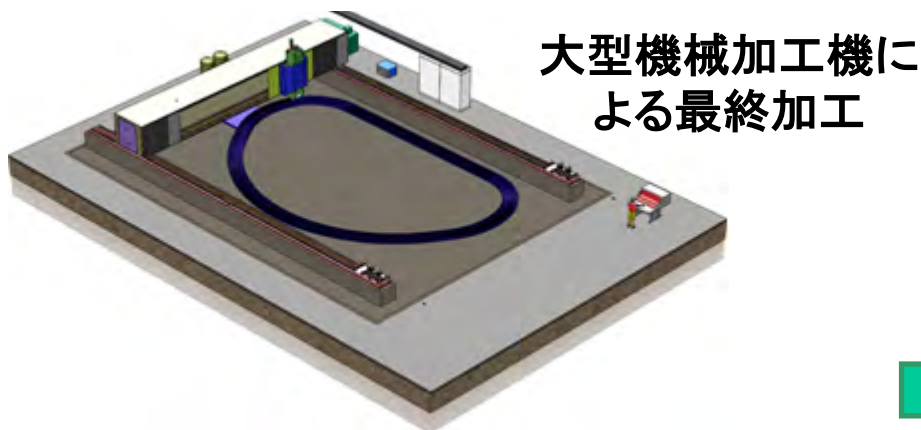
1. 巻線導体長の管理精度 ( $\pm 0.01 - 0.02\%$ )
2. 熱処理による導体長の変化の予測精度 ( $\pm 0.01 - 0.03\%$ )
3. RP製作精度 ( $\pm 0.01\%$ )
4. 寸法測定精度 ( $\pm 0.01\%$  (裕度有))

↓

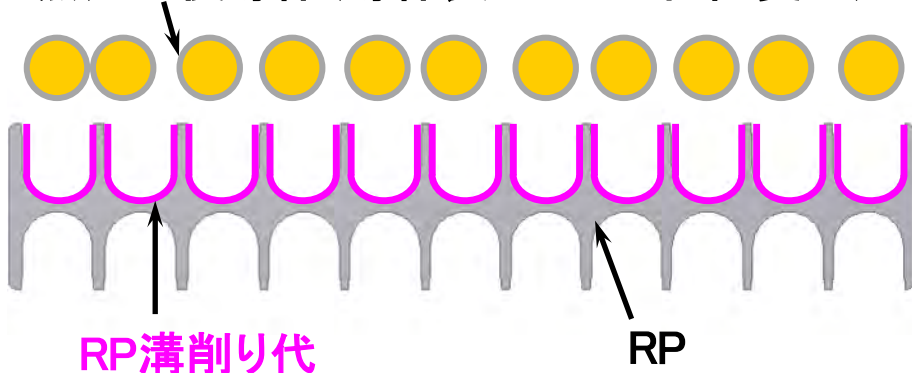
❑  **$\pm 0.04 - \pm 0.07\%$ 以上の導体長公差に合わせてRP溝長を調整**



## 従来のRP周長矯正法

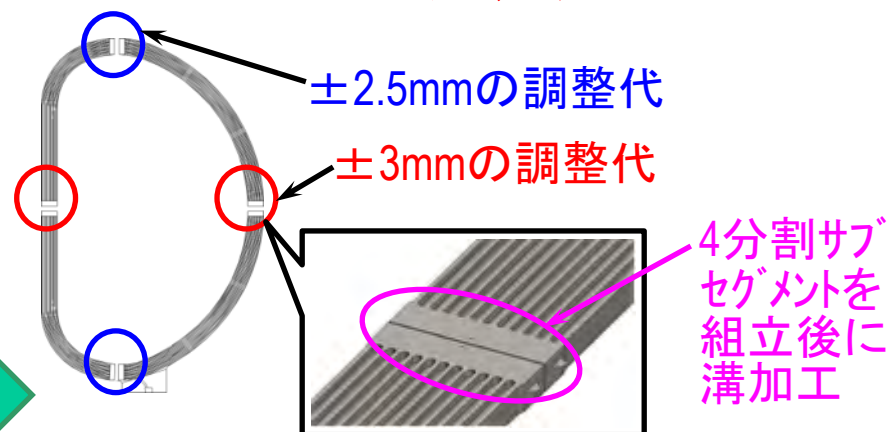


熱処理後導体(導体長によって位置変化)



- $\pm 0.01\%$ のRP製作公差可
- ターン間のバラ付も調整可
- 加工期間は数ヵ月

## 合理化RP周長矯正法



4分割したサブ・セグメントの端部に余肉を設けて、余肉の長さでRP周長を調整

- 加工期間は約1ヶ月
- 調整できる周長が約20%減。高精度製作方法の開発が必要
  - 高精度巻線;  $\pm 0.01\%$
  - RP製作;  $\pm 0.01\%$
  - 熱処理時の伸縮の予測:  $\pm 0.02\%$  (ターン間バラ付は  $\pm 0.01\%$ )

| No. | 主な技術課題                                   | 技術検証の状況と<br>実機適用状況 |
|-----|------------------------------------------|--------------------|
| 1   | ±0.01%の巻線長を可能とする自動巻線技術の開発                | 実機製作適用中            |
| 2   | 熱処理、及び熱処理による導体伸縮の高精度<br>(±0.01%)予測技術の開発  | 実機製作適用中            |
| 3   | 熱処理後巻線のRP溝へのトランスファー技術の開発                 | 実機製作適用中            |
| 4   | RP高出力レーザー溶接技術、及び高精度RP組立<br>(±0.01%)技術の開発 | 実機製作適用中            |
| 5   | CP溶接技術、及び溶接変形低減化技術(平面度<br>3mm以下)の開発      | 実機製作適用中            |
| 6   | DP含浸技術の開発、及び高精度のDP公差(平面度<br>2mm以下)の達成    | 実機製作適用中            |
| 7   | 高精度コイル容器溶接技術(数mmの公差)の開発                  | 実機製作適用中            |
| 8   | 一体化関連(封止溶接、含浸)試作                         | H29年度中に検証          |

## 目次

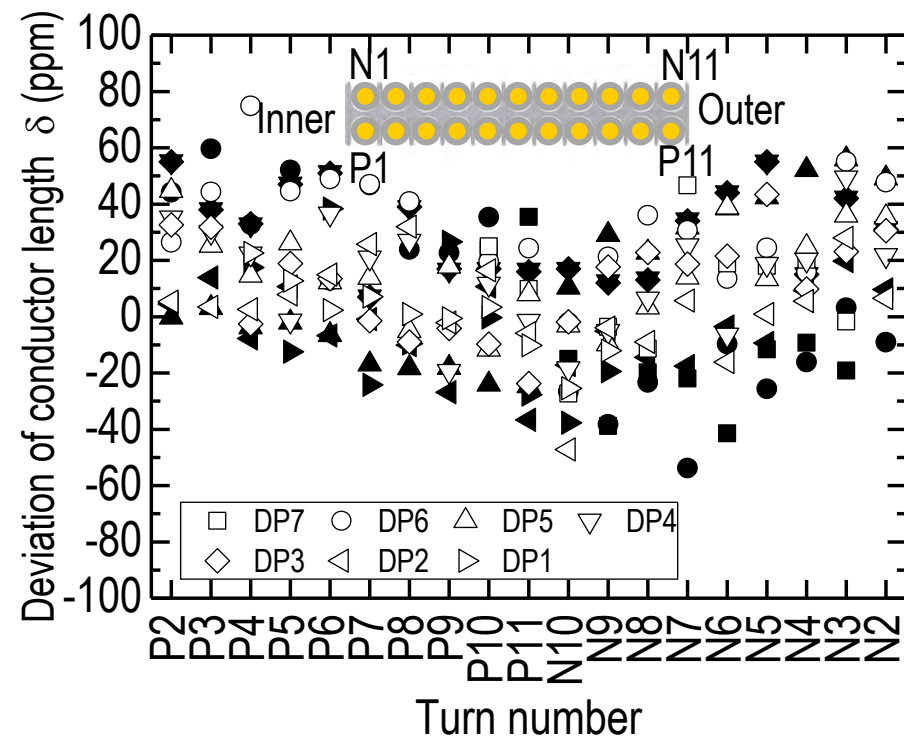
1. ITER TFコイル及び導体の紹介
2. ITER TFコイルの製作
3. まとめ



- H26年3月より実機コイル巻線に着手し、22DP (35%: 全体で63DP) の巻線を完了.



初号機DPの巻線(rDP)

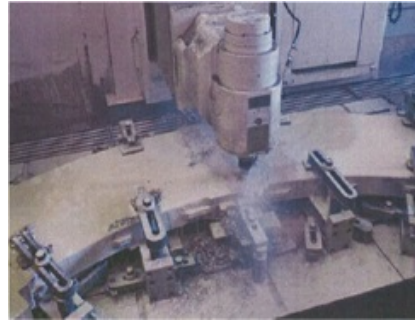
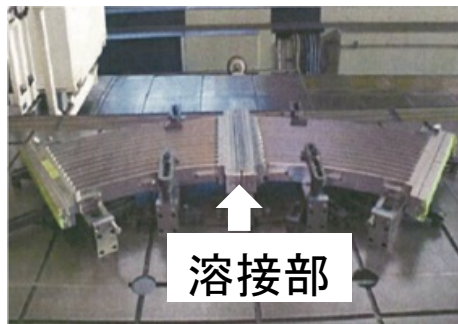


1、2号機DPの巻線長さの測定結果

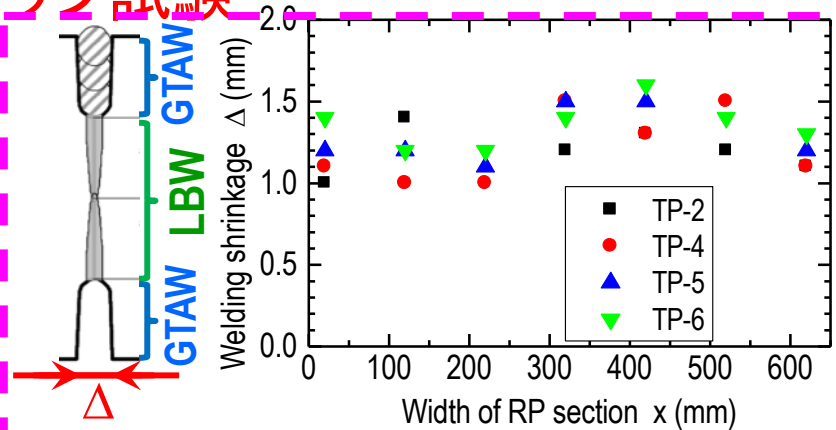
- 導体長の目標公差 $\pm 0.01\%$ を全てで達成
- 標準偏差は20ppm.

# RPモックアップ及びダミーRP製作

## モックアップ試験



□ 平面度の変化は0.1mm以下



## ダミーRP製作



□ 平面度0.9mm以内の高精度加工



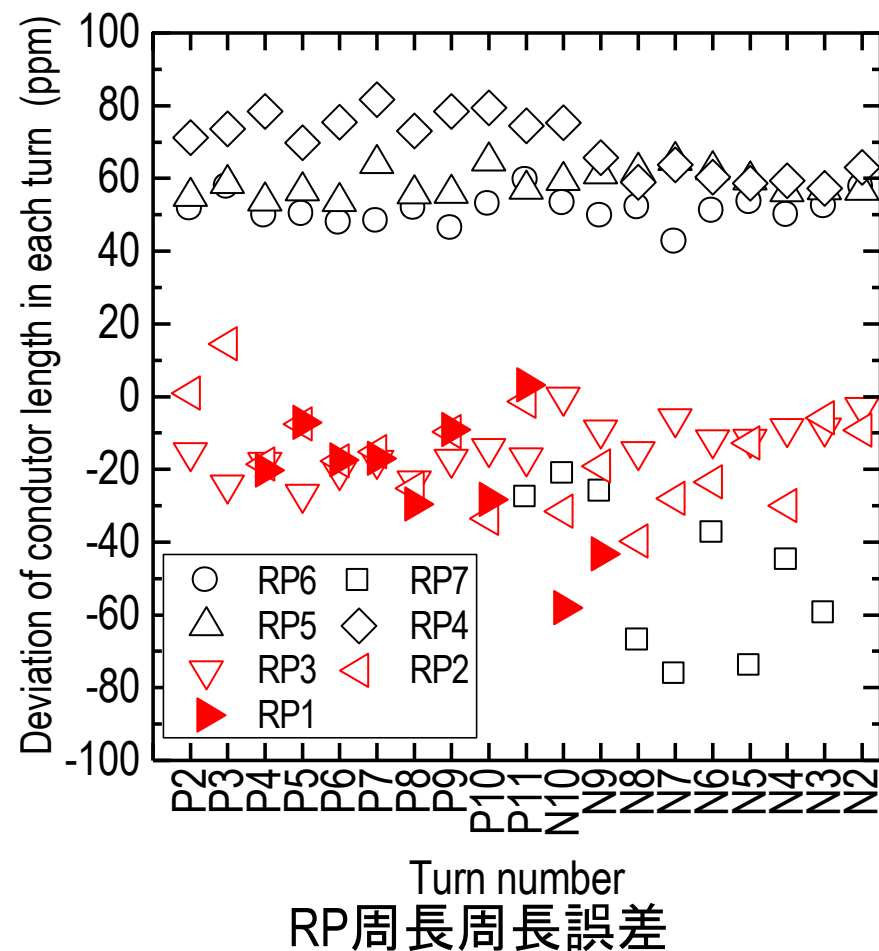
□ RPセグメントの高精度加工可  
 ➔ 実機RPセグメント製作開始  
 (2013年10月)

□ RP組立時の溶接收縮の予測誤差は2(=0.5x4)mm以下  
 ➔ 製作誤差±0.01%達成可能

## □ 14RPの製作完了



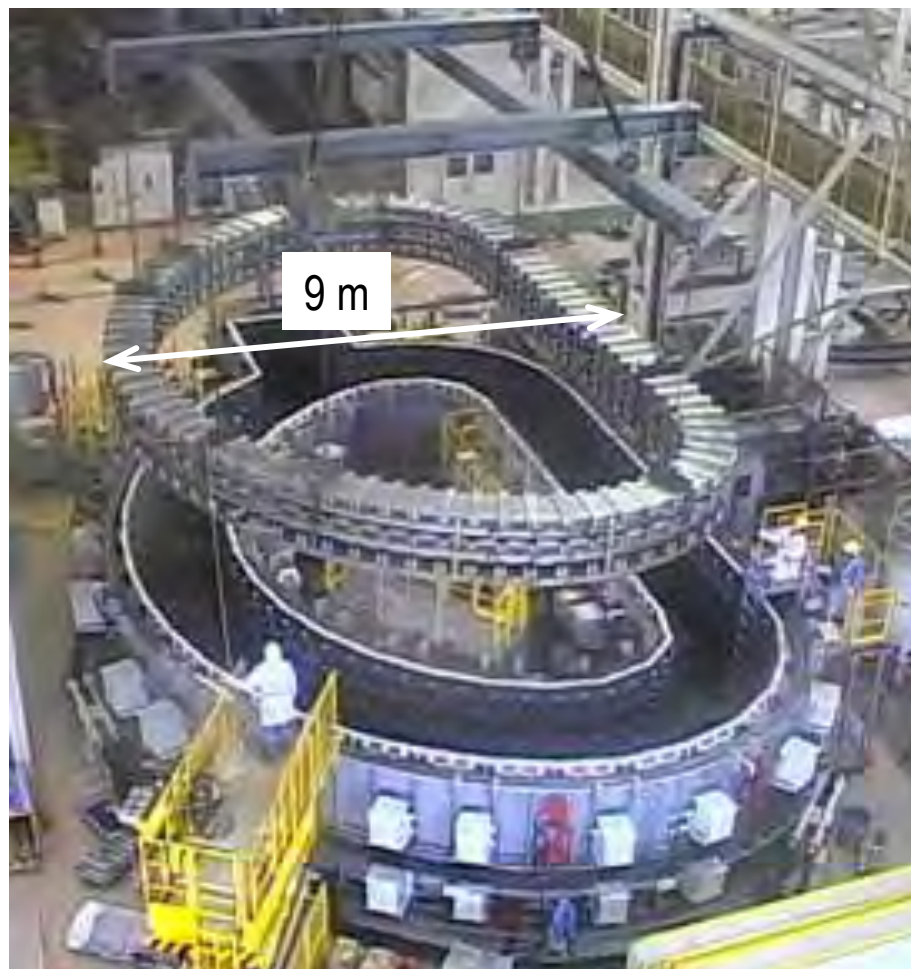
初号機RP6(初号RP)



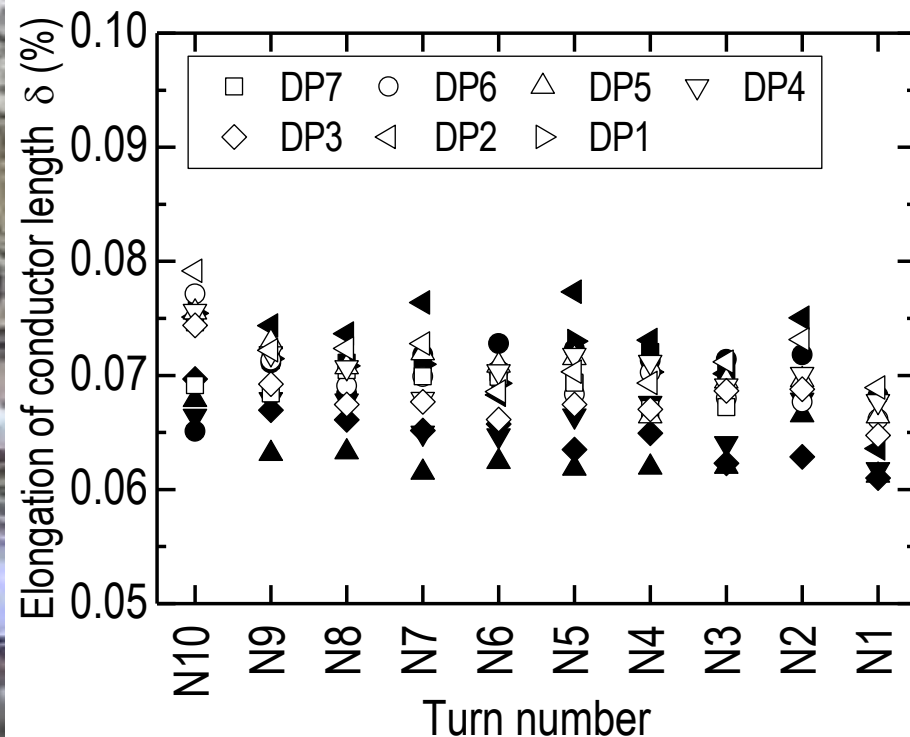
□ 全RPで±0.01% 溝周長公差を達成(±40ppmに改善)

□ 平面度1mm, 輪郭度2mm達成→1mmも達成可能となってきた

□ 18DPの熱処理完了. 3DP熱処理中.

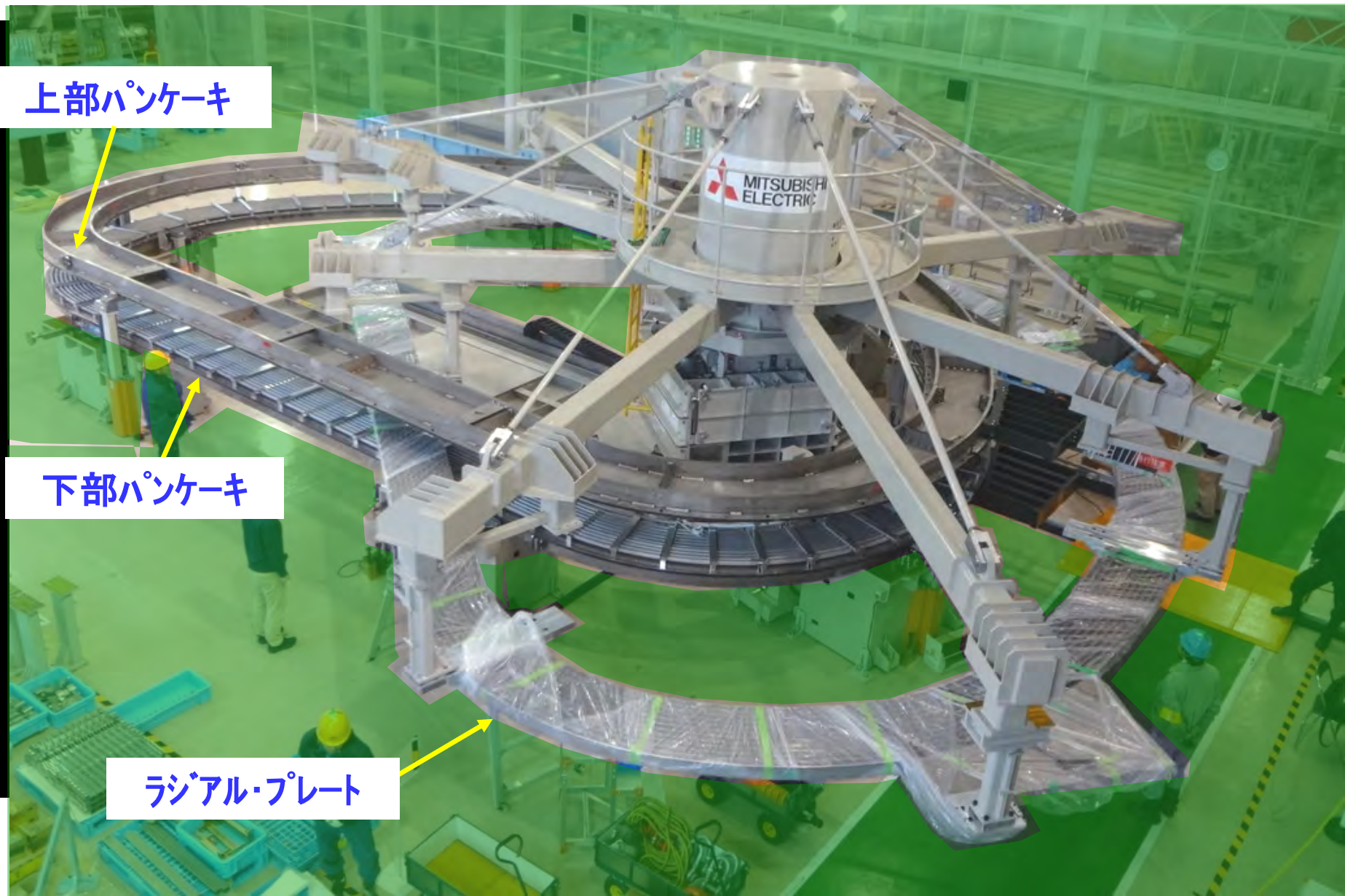


3DPの熱処理準備と熱処理炉

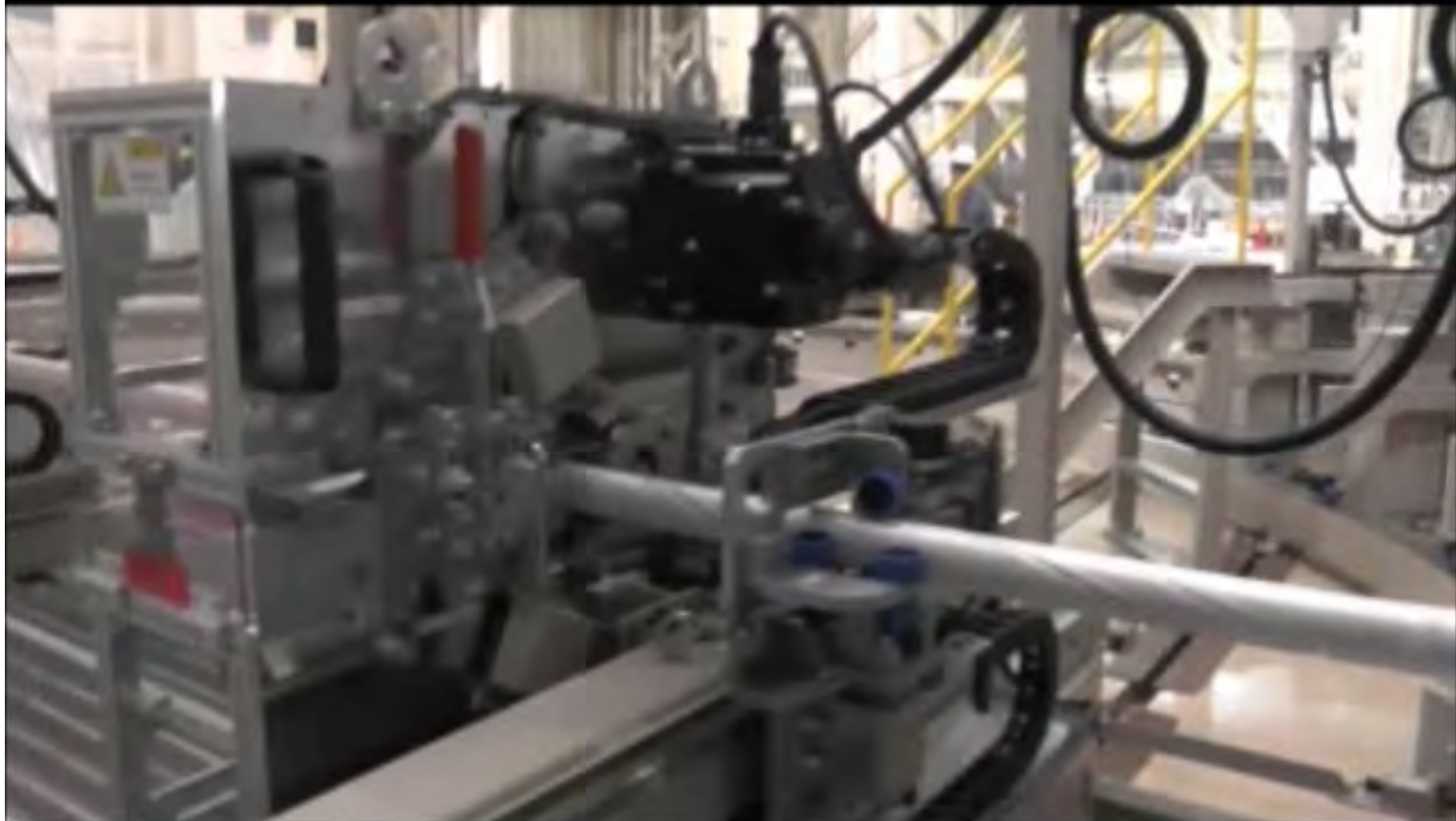


熱処理後の導体の伸び量

□ 熱処理による導体の伸び量  
0.63~0.073; 標準偏差=30ppm

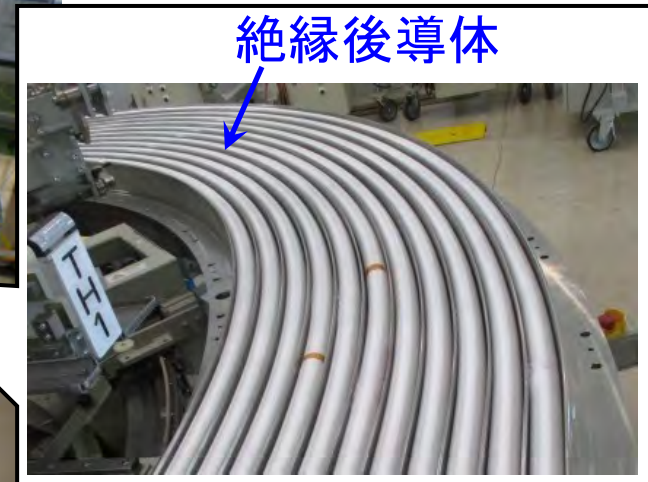
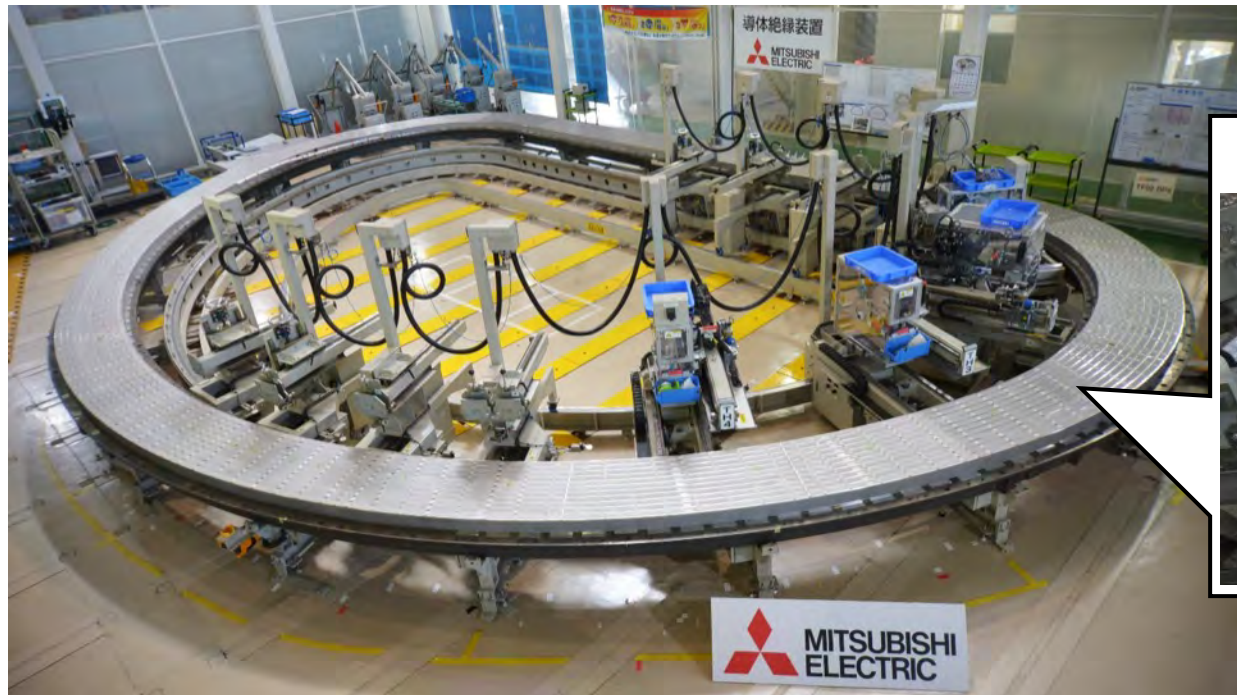


## 導体絶縁治具



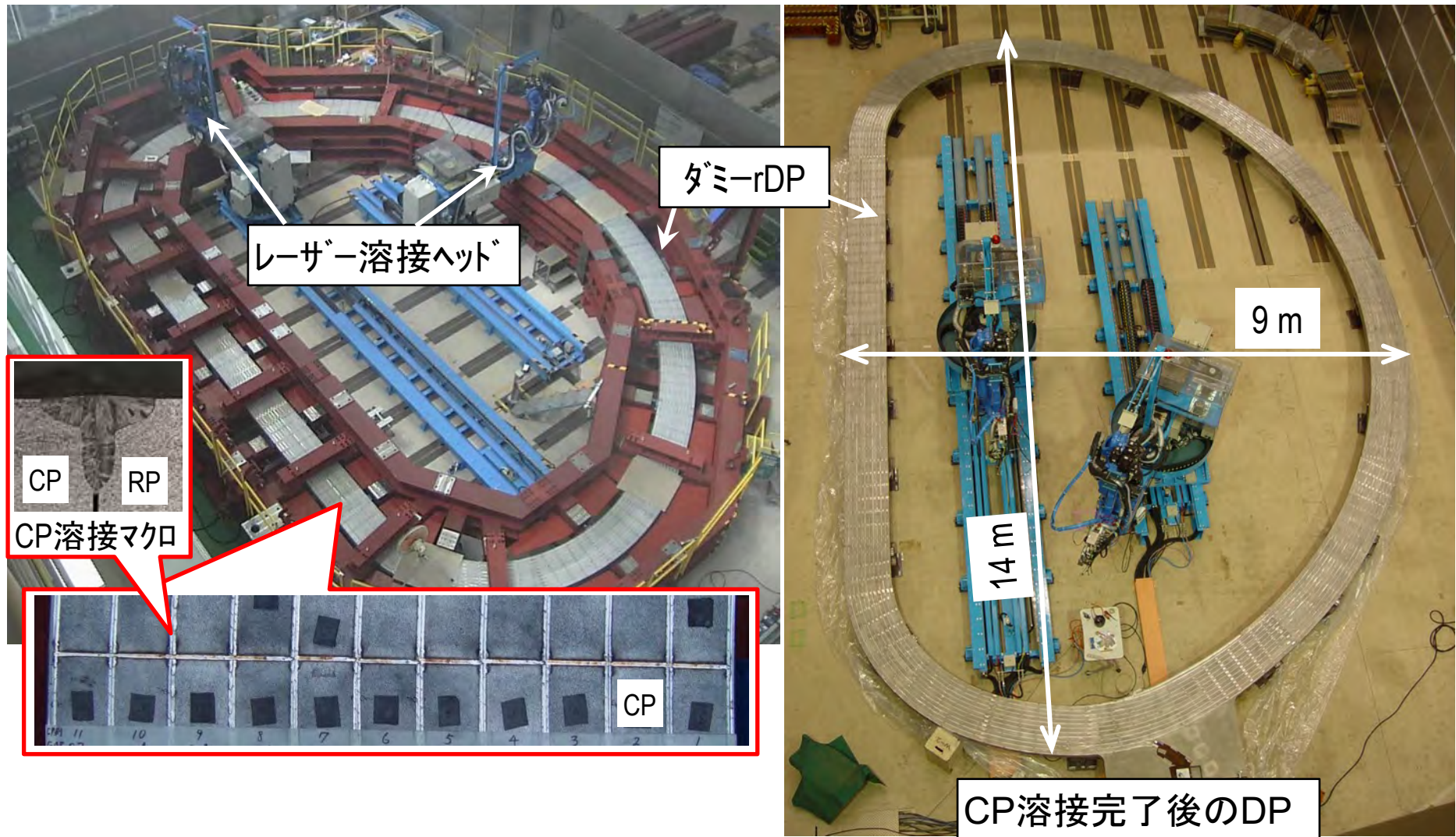
# トランスファー(CP仮付け後)

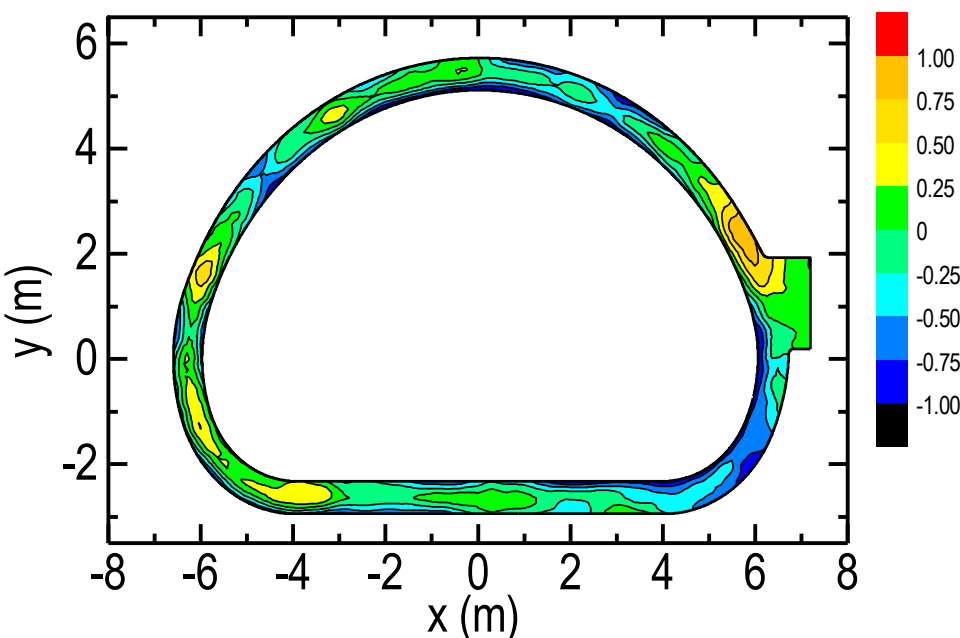
□ 11DPのトランスファー(導体絶縁)完了.



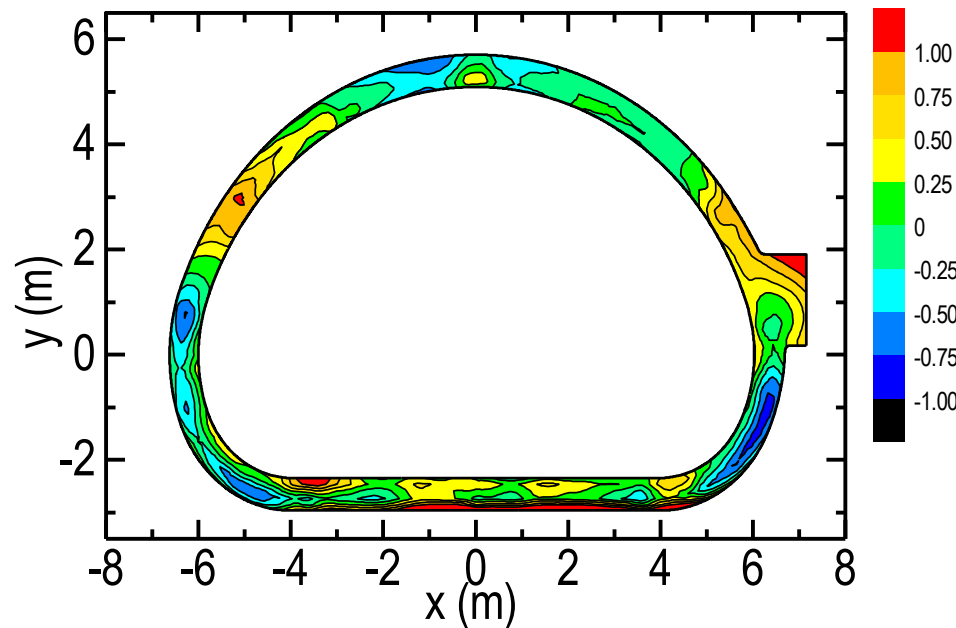


## □ 10DPのCP溶接完了





第1号機DP4面外変形

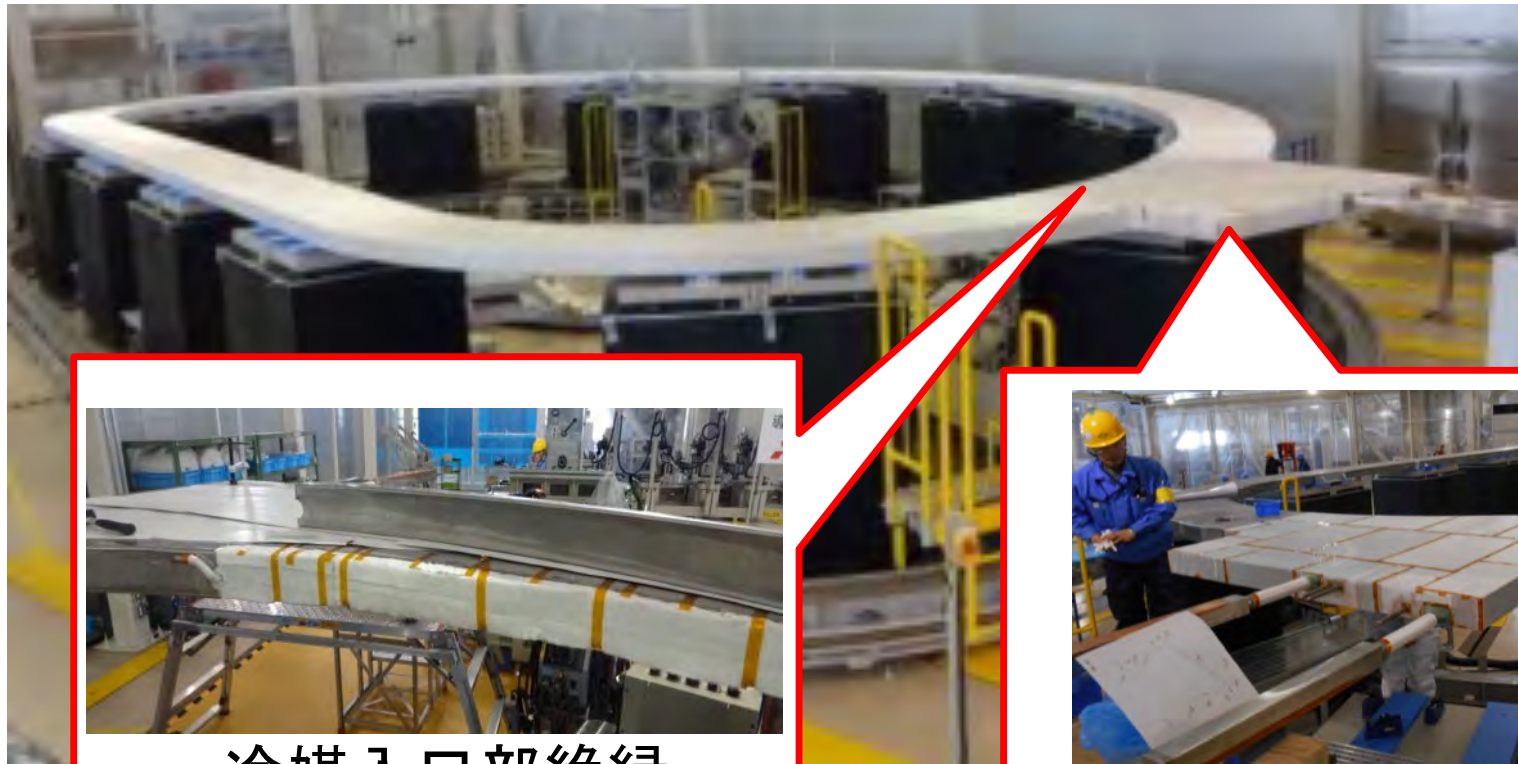


第1号機DP7面外変形

□ rDP平面度: 2.1mm~2.7mm

□ sDP(初号機sDPのみ)平面度: 2.7mm (初期平面度: 2.2mm)

➔ 平面度2mmを目指して改善中

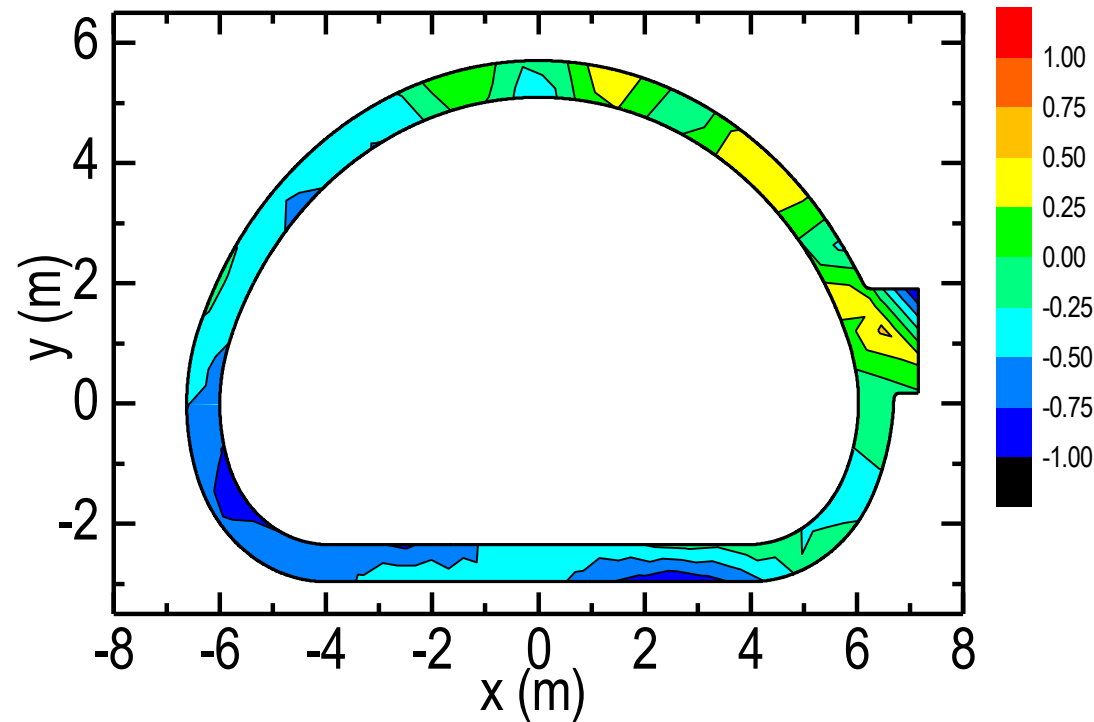


冷媒入口部絶縁



ターミナル部DP絶縁

□ 8DPの含浸を完了



第1号機DP面外変形

□ 平面度2mmを達成



# TFコイル構造物の製作フロー図(例)

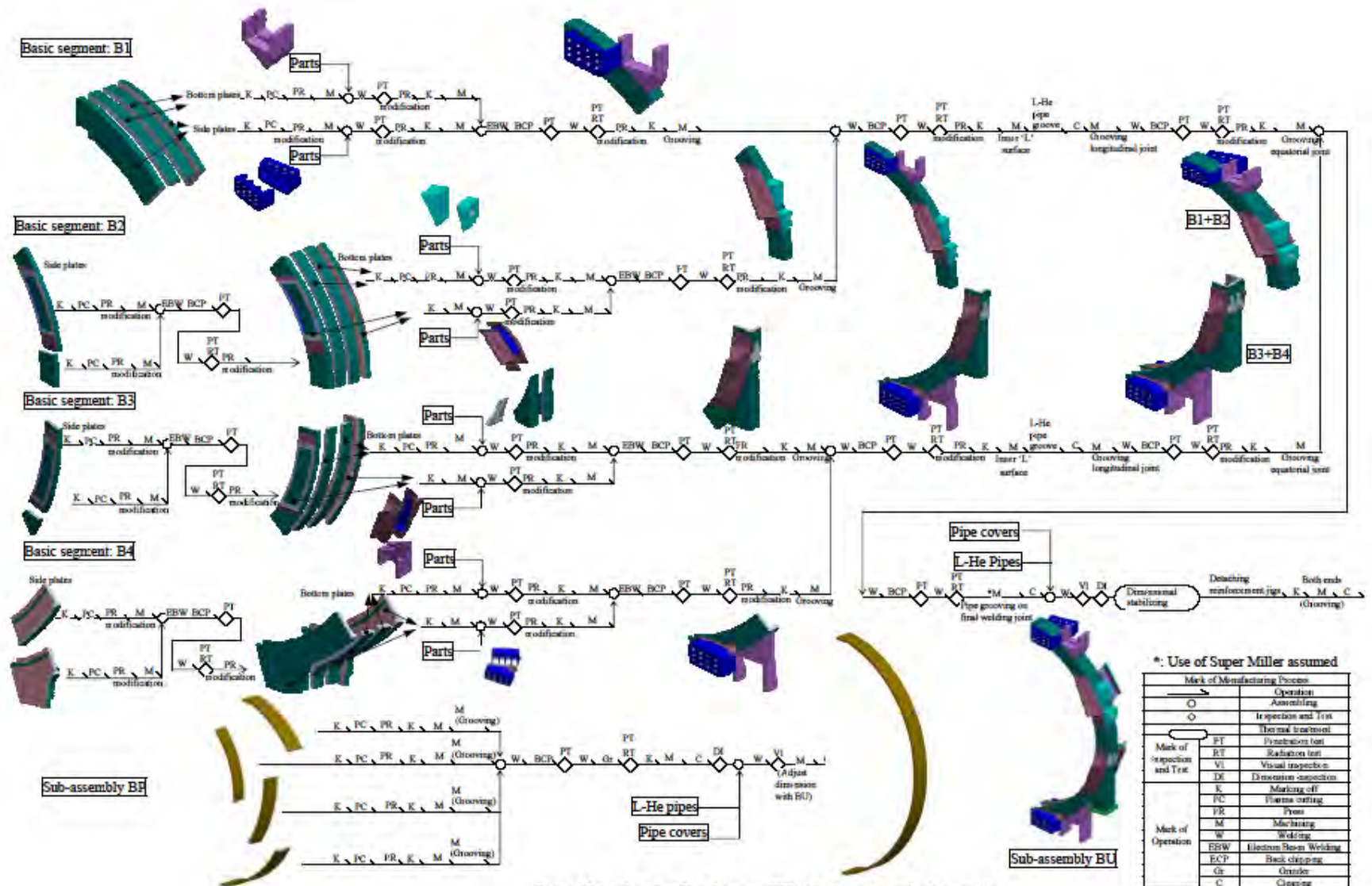
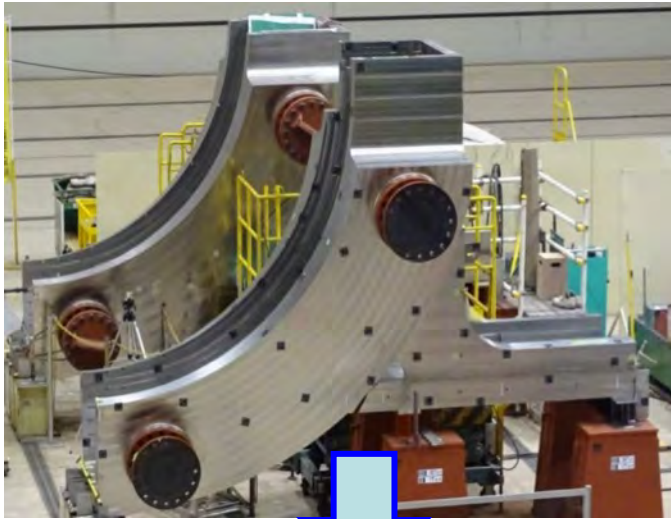


Figure 3 Manufacturing flow diagram of TF coil case: out-board sub-assembly

# 実機コイル構造物インボードの製作

□ 実機コイル構造物12機分の製作を開始.



# 実機コイル構造物アウトボードの製作



□ 溶接量が多く、また、複雑で、ベーシック・セグメントの組立に長期間かかっている。

## ITER TFコイル製作からの教訓

- ITER TFコイルは、その巨大さに対して、厳しい交差が要求されている。多くの試作・試験を通して、その製作技術はほぼ確立し、実機製作も進捗している。
- 一方、原型炉(その先の商業炉)を考えた場合、設計合理化、新たな革新的製作技術の開発が必要。
- この見通しを立てるのは、メーカではなく、国研等の役割。
- 一方、核融合炉は、ニュークリア・プラントであり、国研のみで設計の合理化、新たな製作技術の開発を行うのは現実的ではない。
- メーカと協力しながらも、プロジェクトを主導、牽引できるプロマネ研究者の育成が必要。
- 技術開発には長期間が必要なため、技術開発を進めながら、その中でプロマネを育成していくプログラムの立ち上げが必要。

### 3. ま と め

- 日本では、ITER用TF導体及びコイルの製作を進め、以下の進捗を達成している。
  - ✓ 日本分担の全てのTF導体(33本)の製作を完了した.
  - ✓ 実機コイル製作では、1)第4号機までの22DPの巻線を完了、2)第4号機までの18DPの熱処理を完了、3)第2号機までの11DPのトランスファー及び導体絶縁を完了、4)第2号機までの8DPの含浸を完了.
  - ✓ 実機構造物製作では、12機分のセグメント製作に着手済で、インボード部の5機の組立を完了した.
  
- TFコイルの製作では、その大きさと高精度の公差のため、その製作に苦勞している. 特に、溶接部の多さなどが、さらに製作性を悪くしている. 原型炉では、設計段階から、製作性を十分に考慮した設計がなされるべき; **合理的製作技術の開発、それを通しての、そしてITERでの経験を通した人材育成が重要.**