2013年8月30日　つくば

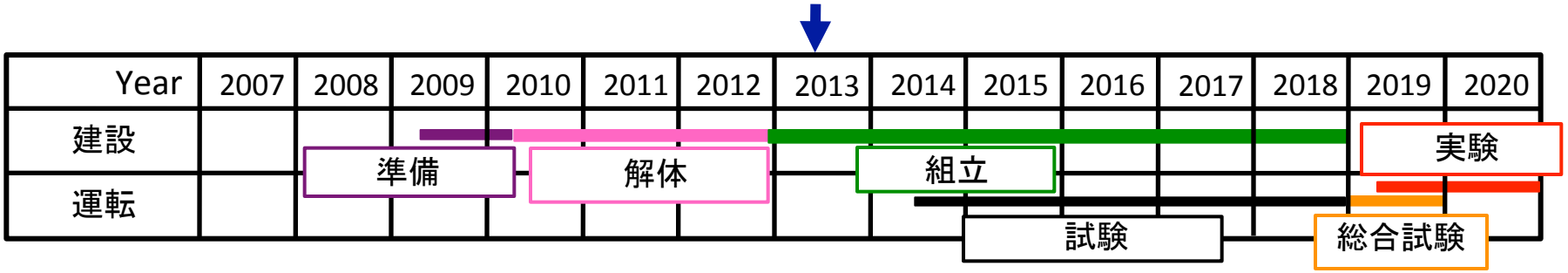
JT-60SA機器組立と製作および プラズマ対向機器の開発の進捗状況

原子力機構　櫻井　真治

1. 組立の進捗状況
2. 主要機器の製作状況
3. ダイバータの製作、開発の状況

1.1 2013年1月より本体組立を開始

2013年1月までに、22件（全コストの85%）のPA（調達取り決め）を締結



JT-60U 解体・収納を完了 => JT-60SA 本体組立を開始

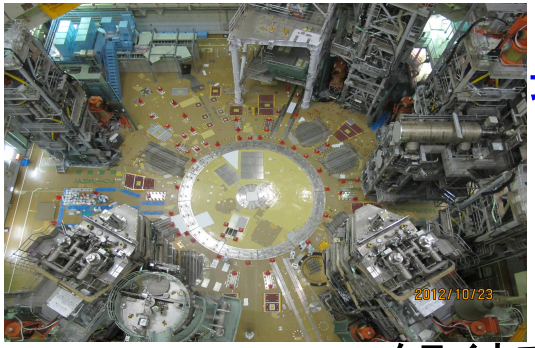
クライオスタット
ベース
（CIEMAT）

日本で初めての放射化した大型核融合装置の解体

放射化物の取扱、作業安全の確保など、詳細な記録を
将来の核融合開発へのノウハウとして収集した。

1.2 JT-60SAの組立手順

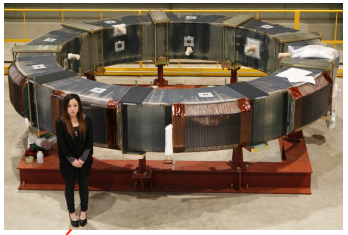
日欧で分担して製作した機器を那珂研で組立
最初の組立として、欧州からのクライオスタットベース（真空断熱容器の基礎）をH25年1月から据付開始（JT-60SA組立開始）



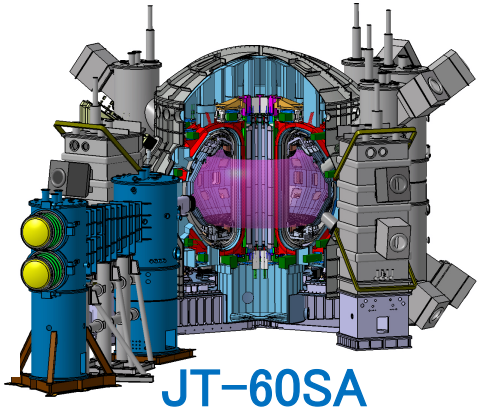
解体終了
（H24.10）

クライオスタットベース

ポロイダル磁場コイル

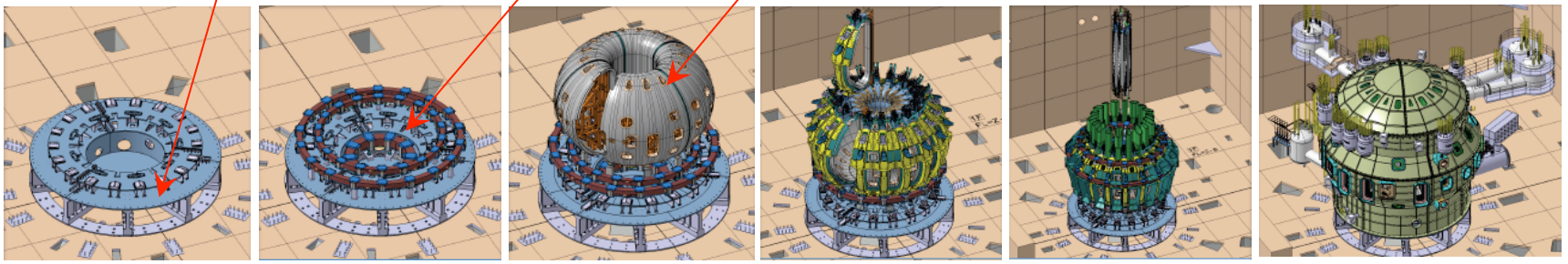


真空容器 40度セクター



JT-60SA
（H31.3）

周辺機器
の設置



組立開始
（H25.1）

クライオスタット
ベース(約260トン)

下部ポロイダル
磁場コイル(約100トン)

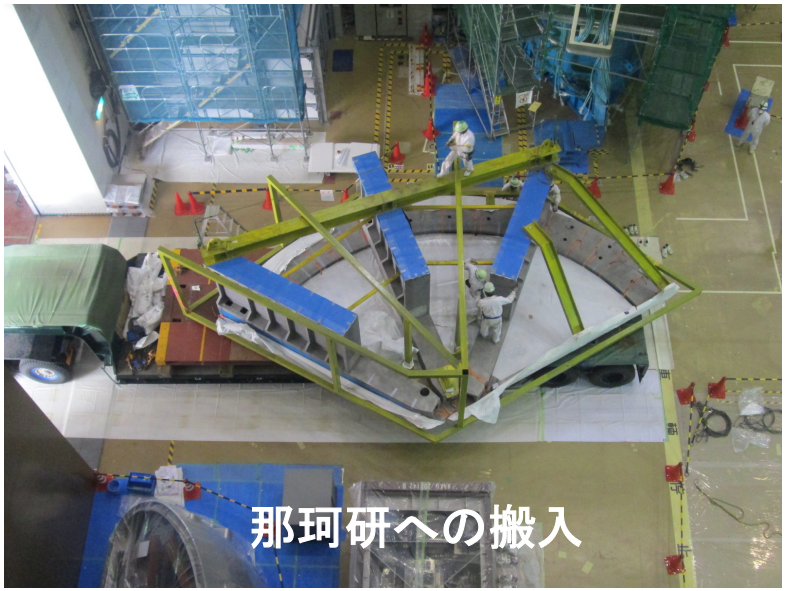
真空容器
(約260トン)

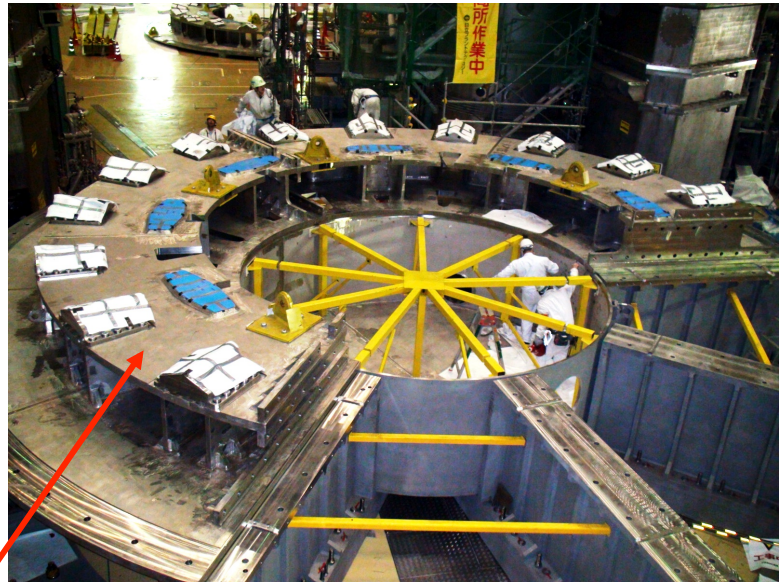
トロイダル
磁場コイル(約380トン)

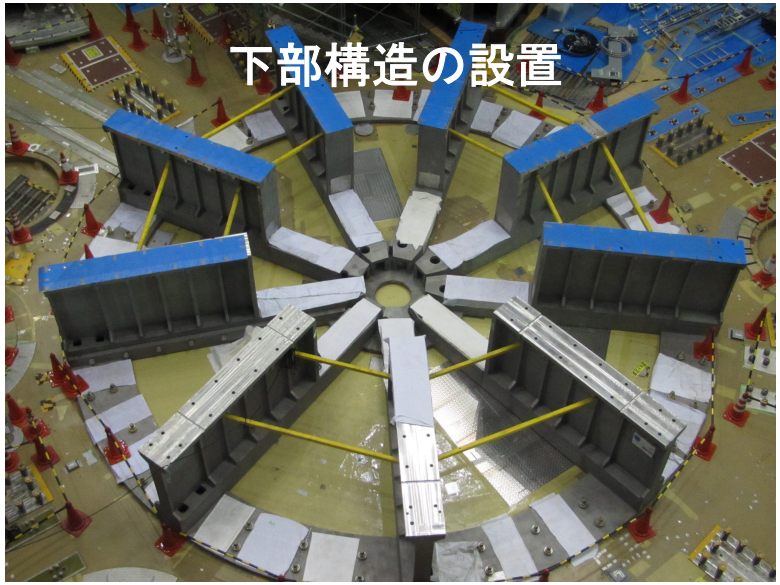
上部ポロイダル
磁場コイル(約170トン)

クライオスタット
(約550トン)

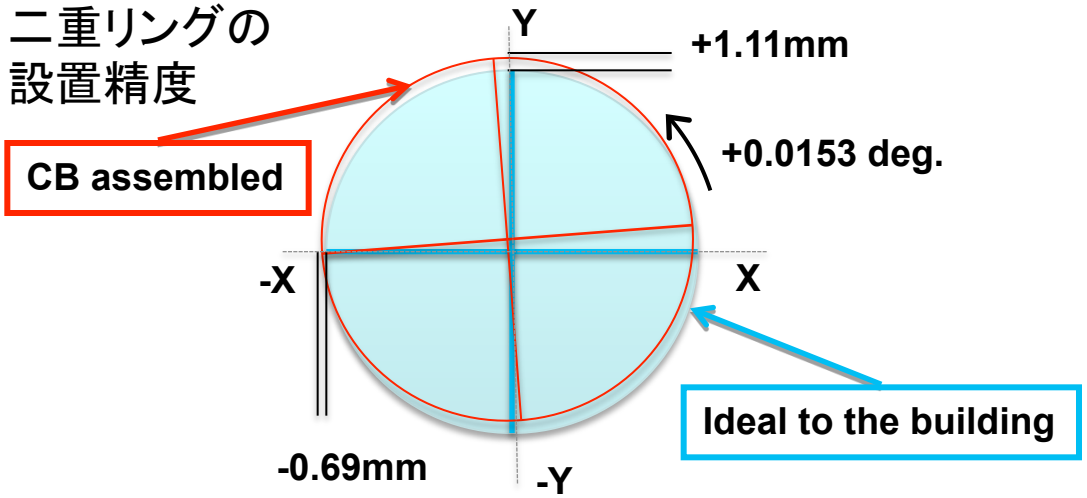
1.3 クライオスタットベース組立







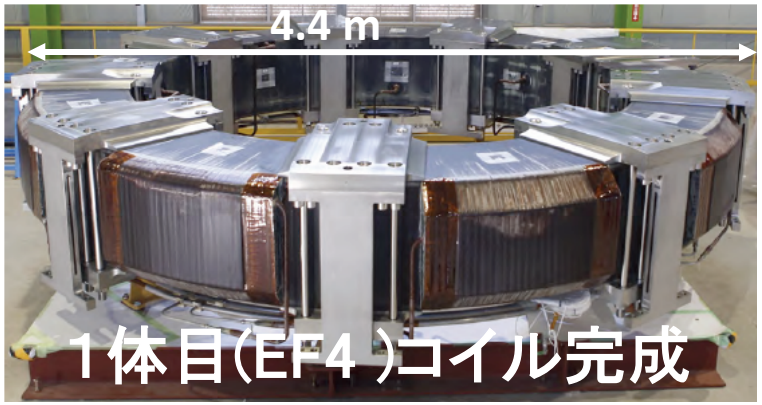
二重リングの
設置精度



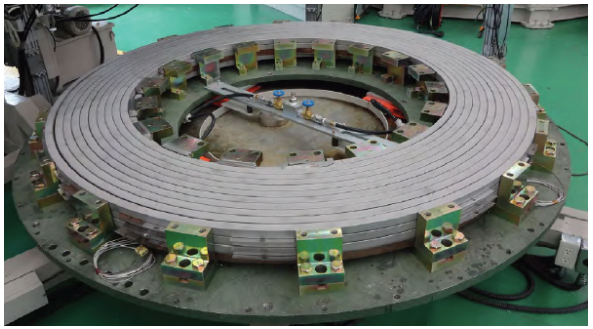
既設NBIとの取合いに十分な精度

2.1 超伝導ポロイダル磁場コイルの製作

超伝導導体製作：順調
EF導体(NbTi) 55%、
CS導体(Nb3Sn) 25%
を製作。

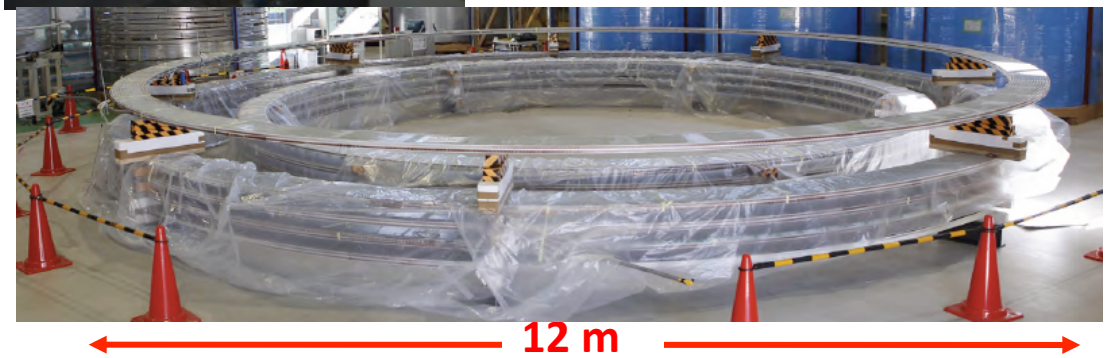


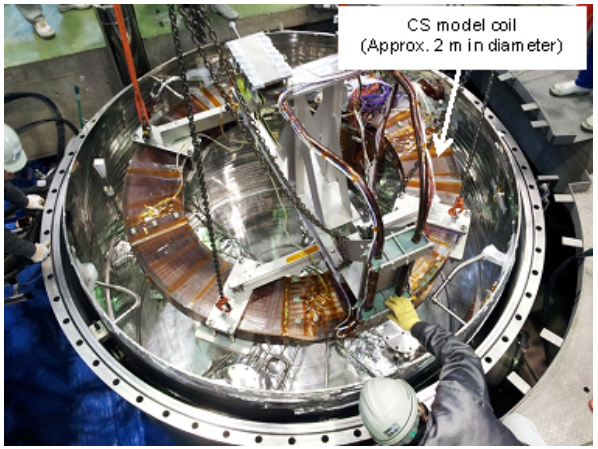
コイル電流中心の真円度=0.6mm
を実現（要求値6mmの1/10）



最初のCS4層パンケーキ巻線完了

那珂研所のコイル巻線棟で、大型の
EF5コイルとEF6コイルを製作中
=>年内に完成して来年初頭に
　EF4＆5＆6を本体室に搬入予定

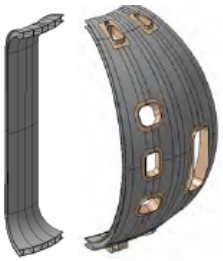




CSモデルコイル試験: 6月(30kA, 3T)
(JAEA/NIFS共同研究)

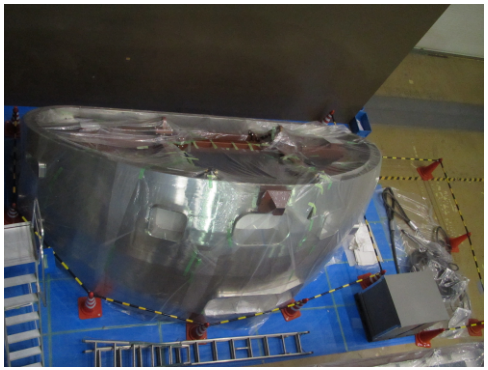
2.2 真空容器の製作

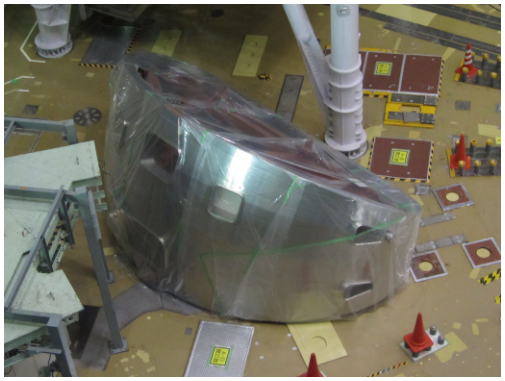
真空容器40度セクター：6体、240度分の製作完了。残り4体はH26年3月までに完成予定。



インボード部と
アウトボード部
の現地溶接接続・組立

那珂核融合研究所
真空容器組立棟





実験棟に搬入

4体目

5体目

真空容器ポート：
120度分18体の製作を完了。
残り240度分37体を製作中。

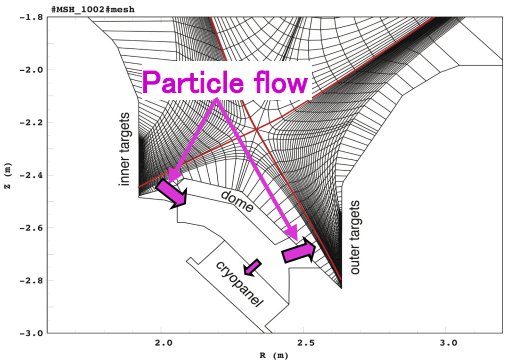
真空容器支持脚：
H24年3月に製作契約
24年度：製作設計を実施
25年度：製作開始

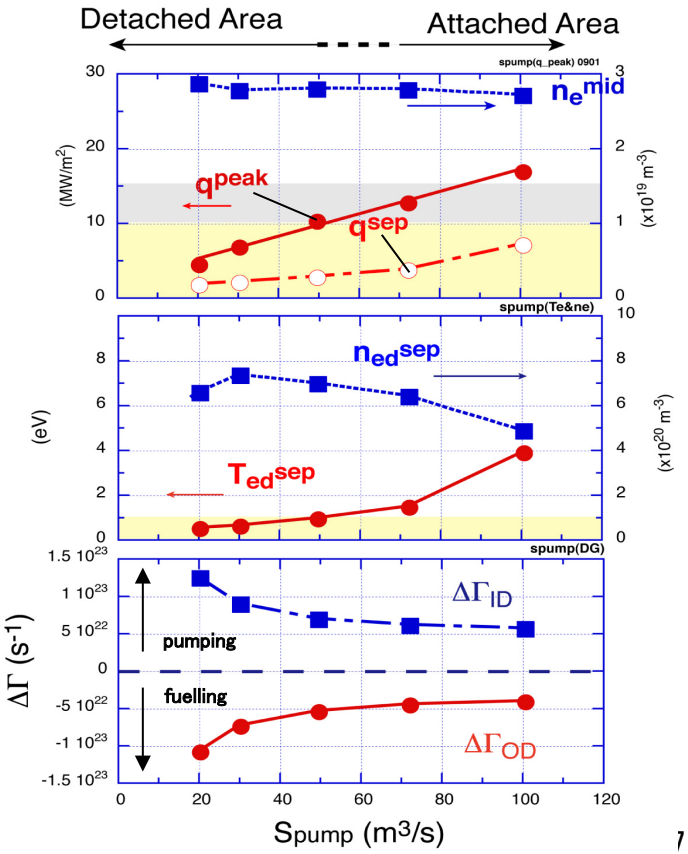
ポートベローズ：
４３体の製作を完了。
H26年3月末までに、
残り12体の納入予定。

3.1 JT-60SAダイバータの目標

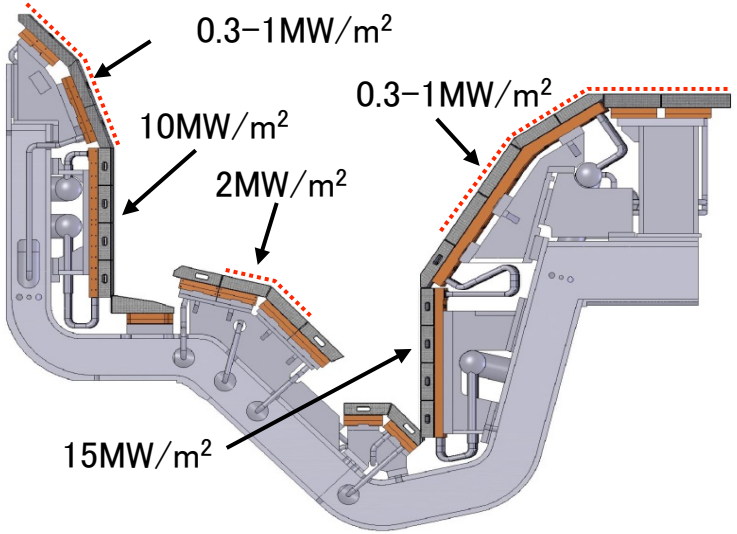
（1）定常・高ベータプラズマでの熱粒子制御
- 高形状因子配位が可能なダイバータ形状
- Vコーナー付き垂直ターゲット
  ＋不純物ガスパス
  ＋VV内クライオパネル（～100m^3/s、多段階可変）

（2）ITER＆原型炉への貢献
- 機動性を駆使したITER実験のパスファインダー
  （従来型のダイバータ概念、形状や材料の変更が可能）
- 中型装置、ITERとの装置間比較
  （サイズの違い、壁材料の違い）による外挿性向上
- シミュレーションとのベンチマーク、
  基礎実験装置との比較による外挿性向上





点線部はVV内で
タイル交換可能



3.2 JT-60SAダイバータの特徴、課題

高形状因子配位での熱粒子制御
⇒内側ダイバータ空間を削減、Vコーナー付き垂直ターゲット（外側ダイバータ）、
VV内クライオパネルによる高排気速度（～100m^3/s、１日毎の多段階制御）

ダイバータ形状、プラズマ対向材（表面）の段階的な改良が可能
⇒プラズマ対向部をモジュール化（部分的に交換、変更）
ボルト固定アーマタイル（部分的に交換、変更、一部タイルを取り出して表面検査）

41MW加熱パワーの除熱
⇒プラズマ対向部は全面水冷
内外ダイバータ板は（将来的には）モノブロックターゲット

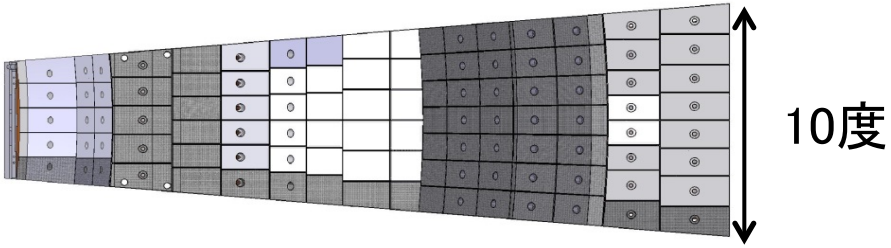
遠隔保守対応
⇒ダイバータカセット方式、配管の切断＆溶接ツール開発

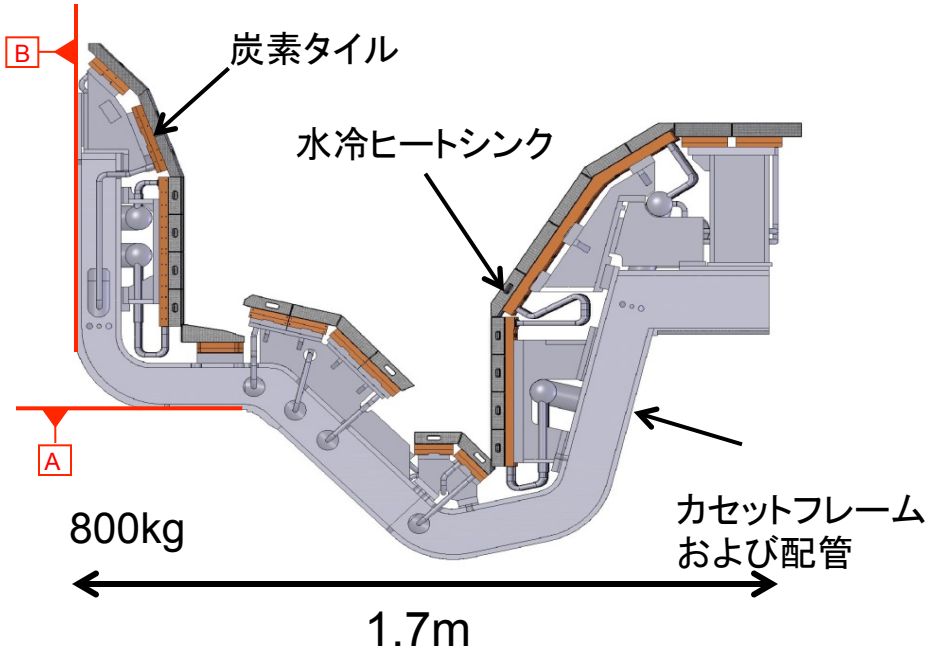
設計上の制約

ダイバータ部に大型ポートが無い
⇒冷却水などの導入は小型垂直ポート使用
カセットの搬入出は大型水平ポート使用

既存設備の再利用と一部改造、建屋空間の制限
⇒冷却水温は100℃未満

3.3 ダイバータカセットの製作





ダイバータカセット（36台）

全36台が完成
（炭素タイルとセンサ取付、一部配管接続等を除く）

カセット設置面（A,B）に対する、ヒートシンク表面の組立精度

内側ダイバータ板≦±0.3mm

外側ダイバータ板≦±0.5mm

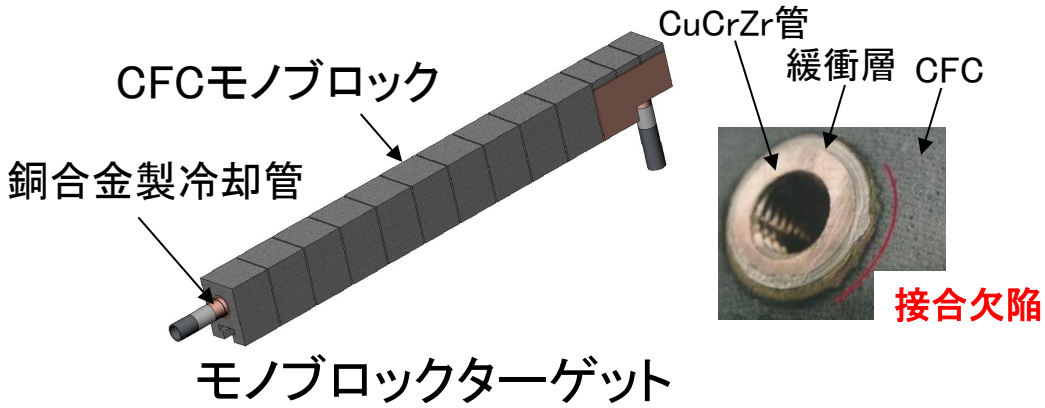
タイルのテーパー、角Rで想定した許容精度（±0.8mm）を満足。

3.4 モノブロックターゲットの製作（1）

41MW加熱x100秒放電では、10MW/m^2（内側）～15MW/m^2（外側）の除熱能力が必要

⇒CFCモノブロックターゲットが必要
（初期は外側の一部のみ：100体製作）

⇒ロウ付け後の急冷と熱収縮差により
CFCとの接合面に欠陥が生じ易い。



量産へのシナリオ

効率の良い除熱性能検査 ⇄ 製作方法の改良

除熱性能の評価

製作方法への反映

赤外画像検査（温水⇒冷水切替時の表面温度応答から評価）をJT-60SA向け改良

熱負荷試験（熱負荷に対する表面温度から評価）{震災等によるマシンタイムの制限のため、量産品への実施を先送りした}

ギャップ、公差管理の見直し

CFC側への前処理（メタライズ⇒Tiコート）

緩衝層材料変更（OFCu⇒WCu）

ロウ付け条件最適化、CFC形状変更

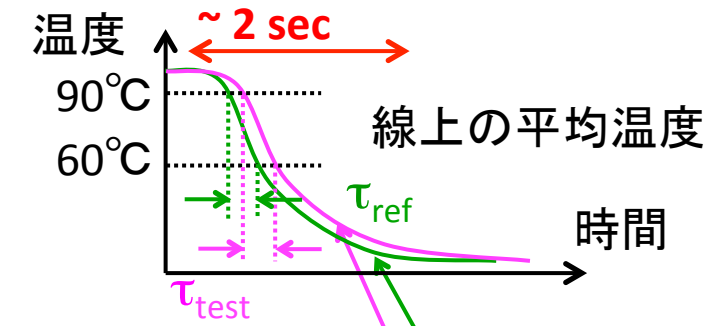
治具改良、部品管理改善

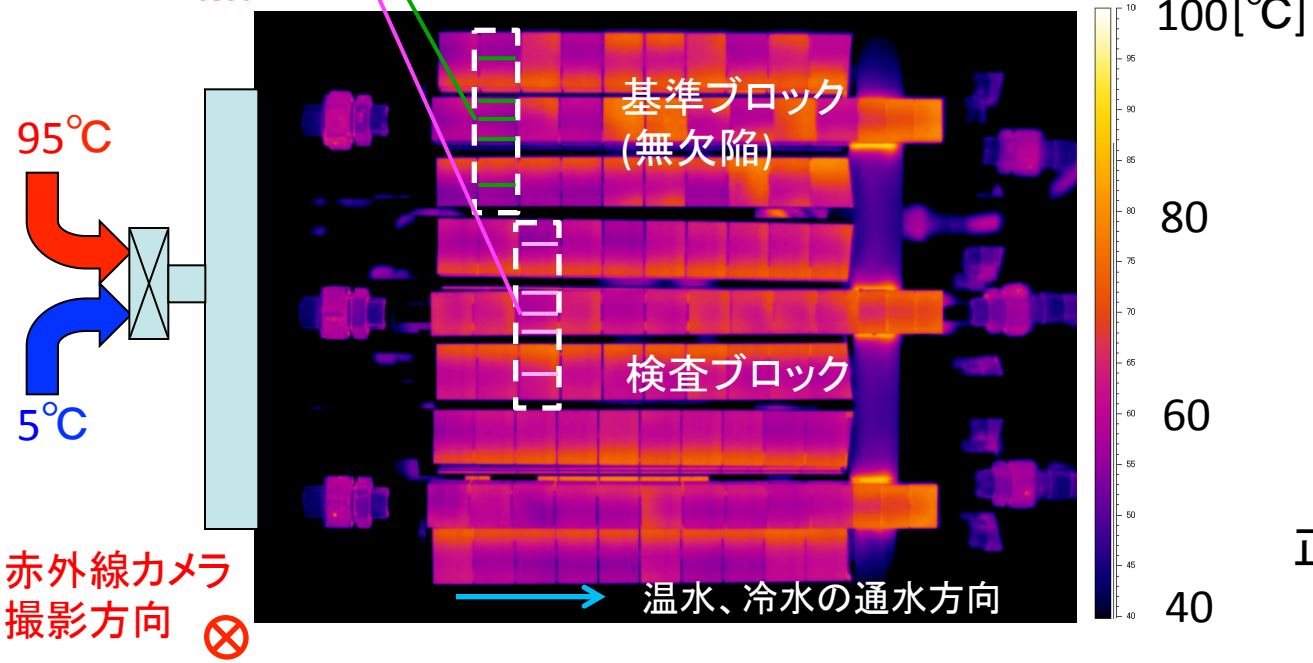
3.5 モノブロックターゲットの製作(2)

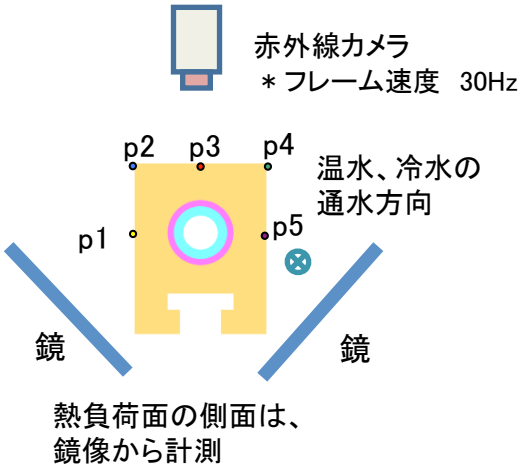
JT-60SA(スクリュー管採用)に適した赤外画像検査方法の開発

冷却時定数(～2秒)に対して、流路毎の冷水立ち上がりタイミングのバラツキ(0.1～0.2秒)が無視できない。

基準ブロックと検査ブロックの表面上の5箇所で、90℃から60℃の冷却時間から求めた正規化冷却時間を用いて除熱性能を評価する。







$$\text{正規化冷却時間} = \frac{\tau_{test}}{\tau_{ref}}$$

冷却時間の測定に影響する要因(流速、初期温度と輻射率補正、雰囲気温度、冷水の水温上昇、CFCブロック熱容量バラツキなど)を評価して、対策および補正した。

3.6 モノブロックターゲットの製作(3)

除熱性能の合否判定の基準の当初の考え方

100体全て熱負荷試験＆赤外画像検査

⇒熱負荷試験で最高表面温度≦XXXX℃(例えば、無欠陥時の1.X倍)を合格とする。

⇒100体分の熱負荷試験結果と赤外画像検査結果の対応関係および10種類の人工欠陥試験体でのベンチマークから、将来の赤外画像検査の合格基準を決定する。

震災によるマシンタイムの制限や、データ解析に相当の時間が必要なことが判ったため、熱負荷試験での全数の合否判定は現実的では無かった。

赤外画像検査で一旦、全数の合否判定を行い、判断が難しい物については後日、熱負荷試験で確認する。

赤外画像検査の合否判定基準をどの様に決めるか？

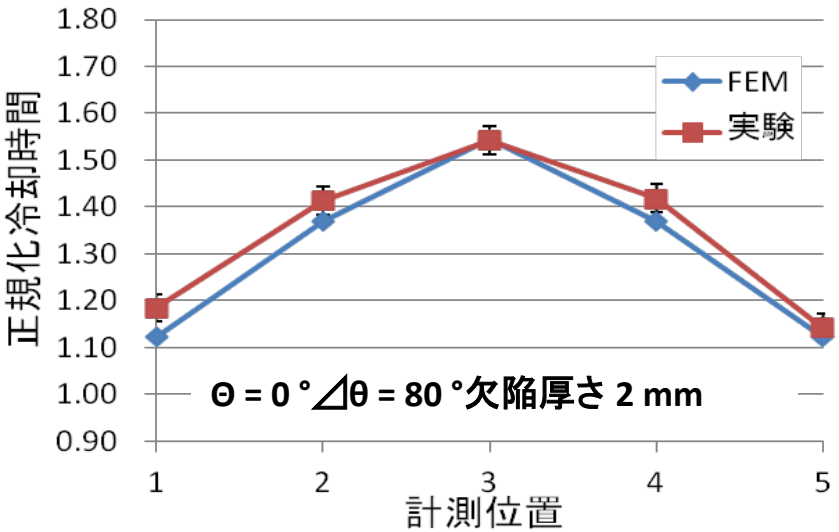
事前に、100種類もの人工欠陥試験体を用意してベンチマークすることは非現実的

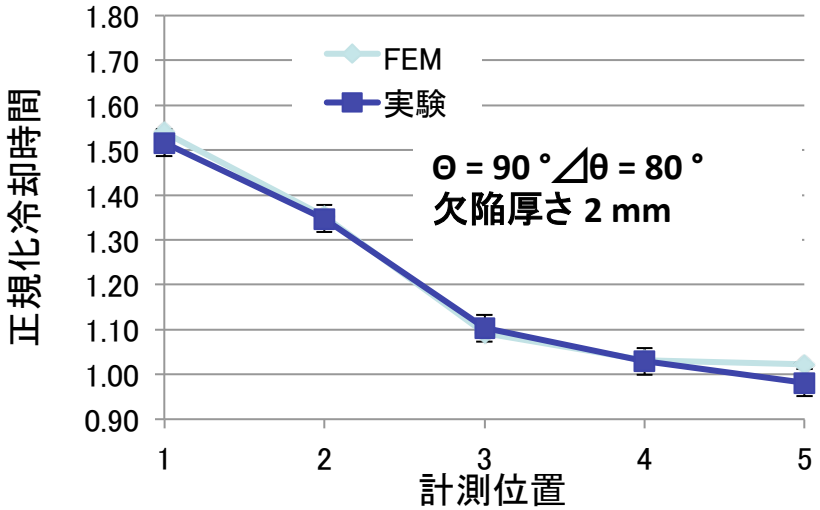
⇒10種類の人工欠陥試験体を用いたFEMモデルと赤外画像試験、熱負荷試験のベンチマークにより、妥当性を確認したFEMモデルを用いて数100種類の接合欠陥分布に対する赤外画像検査(冷却時間)と熱負荷試験(最高表面温度)のデータベースを作成して、判定基準を決定

3.7 モノブロックターゲットの製作(4)

FEMモデルの物性値:ITER用データ等を使用。
スクリュー管の熱伝達率:赤外画像検査(低壁温、一様)、熱負荷試験(高壁温、非一様)の双方に良く一致するモデル(Petukhovの式×1.7)を採用

赤外画像検査とのベンチマーク例

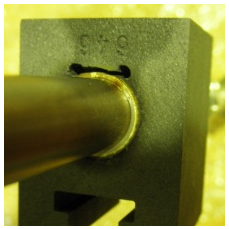




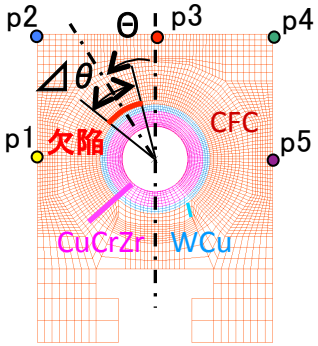
熱負荷検査とのベンチマーク例

欠陥条件			最高表面温度 [℃]		正規化最高表面温度	
Θ[°]	⊿θ[°]	厚さ [mm]	FEM	実験	FEM	実験
0	0	0	1750	1800	1.00	1.00
0	80	2	3500	2000 以上	2.00	1.11 以上
90	80	2	1860	1900	1.06	1.06

$$*\text{正規化最高表面温度} = \frac{\text{検査ブロックの最高表面温度}}{\text{無欠陥の最高表面温度}}$$



既知欠陥加工試験体



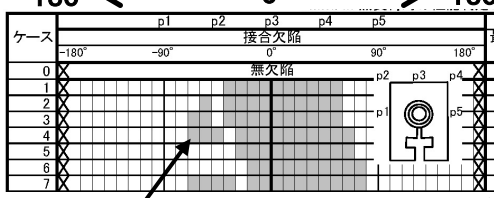
FEMモデル

3.8 モノブロックターゲットの製作(5)

ベンチマーク済みFEMモデルを用いて、種々の接合欠陥分布(～200種類)に対する、冷却時間分布(赤外画像試験測定値)と予想最高表面温度(除熱性能)のデータベース作成

接合欠陥分布

180° ← 0° → -180°



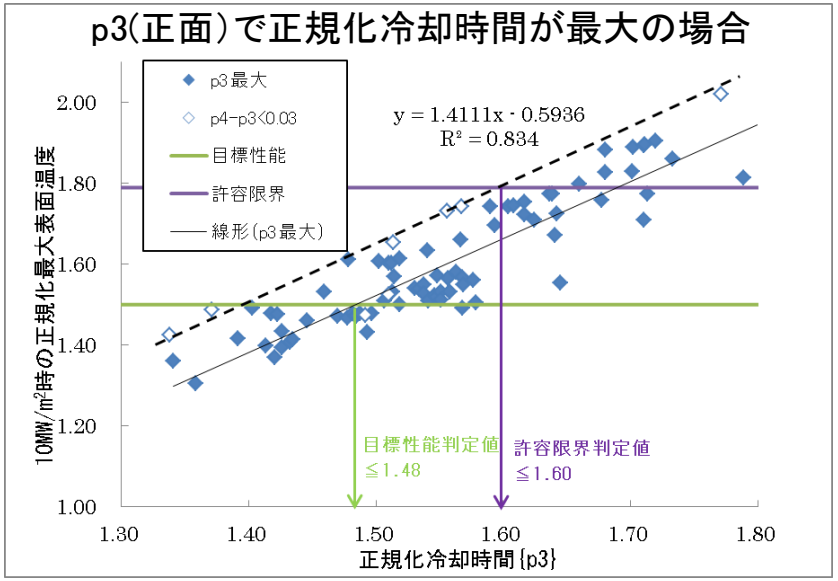
灰色部が接合欠陥

正規化冷却時間

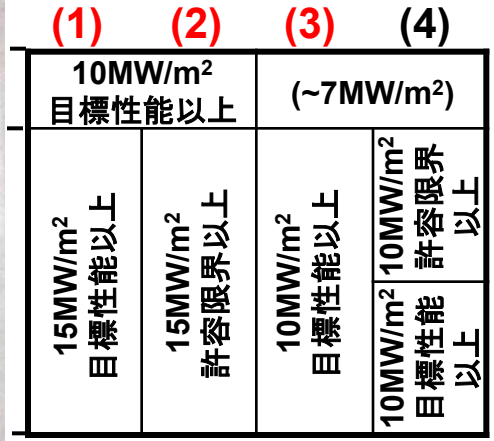
ケース	接合欠陥 -180°	-90°	0°	90°	180°	10MW/m²解析 最高温度(℃)	正規化最高表面温度	FIND用解析 正規化冷却時間 p1	p2	p3	p4	p5	正規化冷却時間最大位置
0	無欠陥					1102	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
1						1767	1.60	1.10	1.29	1.51	1.41	1.19	3
2						1778	1.61	1.11	1.30	1.52	1.41	1.19	3
3						1800	1.63	1.13	1.33	1.54	1.42	1.19	3
4						1831	1.66	1.13	1.31	1.57	1.48	1.26	3
5						1771	1.61	1.07	1.22	1.50	1.45	1.25	3
6						1775	1.61	1.05	1.17	1.48	1.48	1.33	3
7						1869	1.70	1.14	1.31	1.59	1.54	1.35	3
182						1559	1.41	2.49	1.47	1.24	1.57	1.98	1
183						1579	1.43	2.05	1.62	1.33	1.62	2.05	1
184						1579	1.43	2.05	1.62	1.33	1.62	2.05	1
185						1724	1.56	2.88	1.64	1.25	1.64	2.88	1
186						1519	1.38	2.45	1.43	1.16	1.43	2.45	5
187						1773	1.61	1.90	1.63	1.65	1.63	1.90	1
188						1439	1.31	1.25	1.27	1.36	1.27	1.25	3
189						1659	1.51	1.57	1.51	1.58	1.51	1.57	3
190						1446	1.31	1.45	1.32	1.34	1.32	1.45	5
191						1615	1.47	1.55	1.47	1.53	1.47	1.55	5

10MW/m²に対する正規化最高表面温度

15MW/m²に対する判定基準も同様に決定



ブロック位置による判定基準



量産バッチの良品率(%)の推移

バッチ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	計
(1)	33	0	0	50	20	10	10	10	0	0	22	86	100	39本
(2)	0	0	15	40	20	10	0	0	15	17	11	7	0	17本
(3)	67	100	85	10	35	55	50	50	46	83	56	0	0	60本

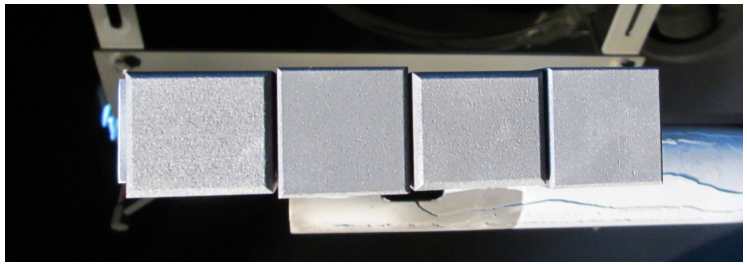
CFC形状変更　部品管理改善など試行錯誤　キーとなる要素を概ね同定

要求性能を満たすターゲット100本以上を製作し、歩留まり改善の見通しを得た。先送りしていた熱負荷試験など実施中。

3.9 タングステン壁に向けた技術開発

ダイバータカセット遠隔保守用マニピュレータの可搬重量の制限のため、
JT-60SAでは、バルクWは部分的にしか使用できない。
⇒モノブロックターゲットの製作方法と整合し、十分な耐久性を有する
　CFC表面へのW被覆または接合技術の確立が必須

委託研究などを活用して、要素技術の試作を開始
H24年度（九大）：厚肉（≧1mm）のW被覆の試作を実施。



CFCブロック（W溶射前）

プラズマ溶射

CFCブロック（W溶射後）

H25年度（室蘭工大）：W板（≧1mm）とCFCブロックの接合試作を実施中。

CFCロウ付け工程（1000℃のプリベーキング、ロウ付け温度からのガスクエンチ）への耐久性を確認後、短パルス熱負荷試験を予定。

まとめ

（1）2013年1月より本体組立を開始、3月にクライオスタットベース設置を完了

（2）EF4の製作を完了、EF5,6及びCSを製作中

（3）VV40度セクター6体の製作を完了。残り120度分（4体）を製作中

（4）ダイバータカセットおよびモノブロックターゲットの製作を完了
　ターゲットの接合自体は改善された。熱負荷試験などを実施中。

（5）カセット配管切断＆溶接装置の製作を完了
　溶接条件等の最適化等を検討中。

（6）委託研究等を活用して、CFCへのW被覆・接合技術の開発を実施中