

ITER/BA成果報告会2024

三菱電機の核融合への取り組み

Mitsubishi Electric's activity for Nuclear Fusion

三菱電機株式会社電力システム製作所
原子力部 放射線計装設計課

三菱電機株式会社

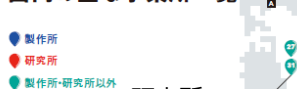
(当社採用HPより抜粋, 12の事業分野の1つとして核融合への取り組みを継続してきました)

フィールドは家庭から宇宙まで

幅広い事業領域、そしてそれらを結合させ、生み出すソリューション。きっとあなたが「わくわく」するフィールドが待っています。



国内の主な事業所一覧



研究所



三菱電機神戸地区
(好立地をアピールしています!)



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



高強度の強制冷却導体を複雑な形状(例えばITER TFコイル)に**自動巻線**する製作技術を軸に、大型超電導コイルの製造技術を蓄積してきました。



【ITER/BA成果報告会2016】



【ITER/BA成果報告会2015】

1ターン(平均34m)の導体長差
⇒ 平均0.4mm(0.0012%)

2) これまでの取り組み(核融合関係のトピック) (続き)

JT-60SA PFコイル(CS, EF)

平衡磁場コイル(EF)

JT-60SAの日本担当分の超電導コイル(平衡磁場コイル(EF), 中心ソレノイド(CS))の製作全てを担当した。自社開発の連続巻線機により高剛性導体の高精度巻線を実現した。

中心ソレノイド(CS)

核融合実験炉(ITER) TFコイル

巻線部組立完了

ITERのトロイダル磁場コイル(TFコイル)の日本担当分のうち5基を、三菱重工業株式会社と協力して製作をすめ、主に巻線部を担当した。2023年8月には、約11年にわたる長期工事を完了し、TFコイル最終号機を納めた。

【ITER/BA成果報告会 2023当社ポスターより抜粋】

3) 現状及び今後の取り組みについて(本発表)

JT-60SA増力工事

クライオスタット

真空容器

真空容器内機器

2022年よりトカマク本体機器及び容器内機器の組立作業を受注し、ファーストプラズマ後の改造工事に取り組んでいる。JT-60SA本体装置及び周辺設備の電力供給能力を拡大して本体装置に導入する。そのために必要な本体増力機器、本体機器配管、容器内機器の増設工事を行う。

①JT-60SA増力工事(通称)

2023年12月ファーストプラズマ後

2024年1月から開始した改造工事。当社受注範囲の機器は以下の通り

真空容器外：一体化ポート、冷却水配管、バウンダリボックス、上部共通架台
 真空容器内：誤差磁場補正コイル(EFCC)、高速プラズマ位置制御コイル(FPPC)
 抵抗性壁モードコイル(RWMC)、安定化板
 容器内冷却水配管、ビーム保護板 等

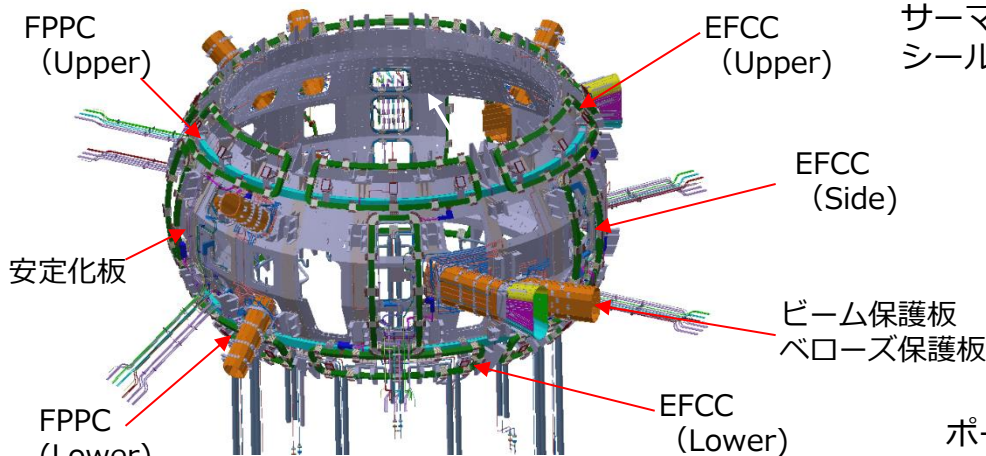
②核融合原型炉開発の加速に寄与

短ピッチ撚り導体を用いたTFコイルのコンパクト化
 ターン間絶縁材の破断抑制に繋がる『2段曲率構造』を提案

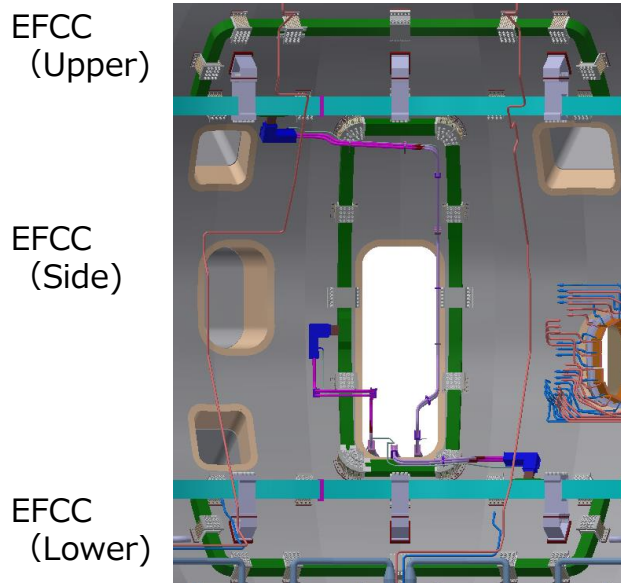
JT-60SA増力工事について

Topics of JT-60SA Update

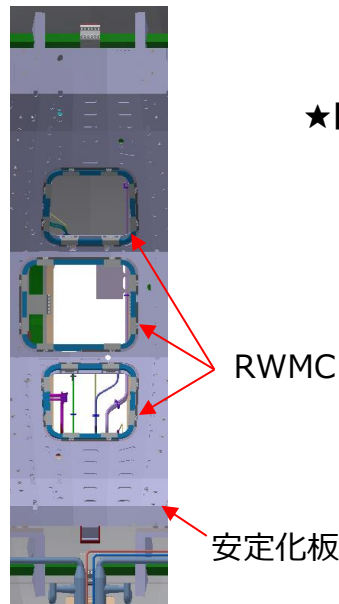
真空容器内組立機器 (INVESSEL COMPONENTS)



中心側から見た図[安定化板無]



[安定化板有]

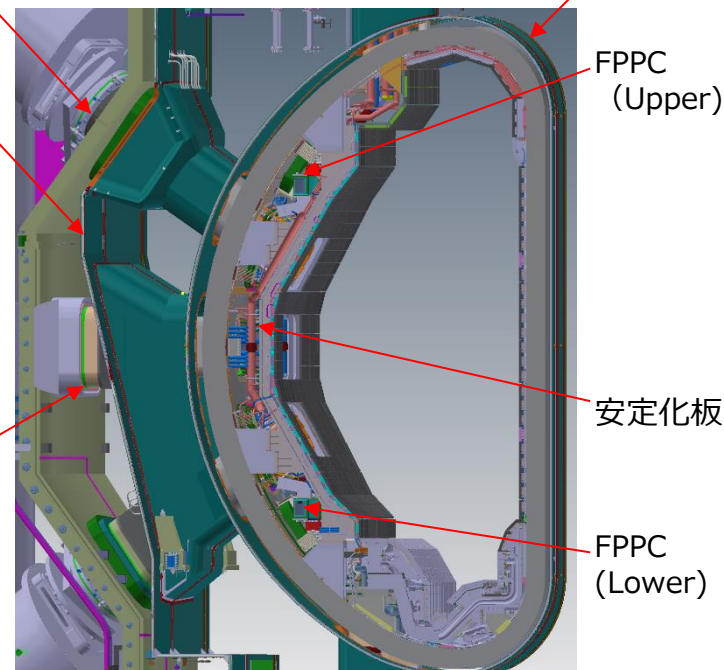


クライオスタット(既設)

サーマル
シールド(既設)

ポート
(既設&新設)

真空容器(既設)



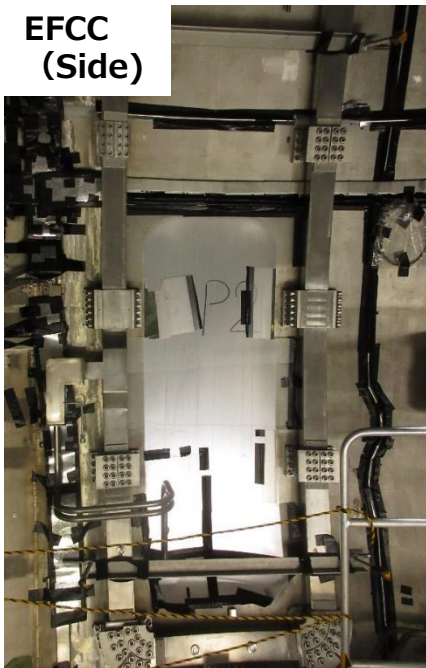
★困難なポイント

- ① **既設構造物への高精度組立**(レーザートラッカーを用いたアライメント, 各機器を組立座標系に基づき設置する。**測定要領/精度ともに高難易度**)
- ② **真空容器内での取り回し**(そもそも実験空間なのでものの運搬できる機材等はない)
>相当詰め込まれた状態で**成立解が限られている**。
・・・**大きなボトルシップ組み立てるイメージ**
- ③ **輻輳する工程**(限られたスペース/複数社の作業)
>想定外の事象がたびたび発生し工程挽回に苦慮

FPPC : 高速プラズマ位置制御コイル
EFCC : 誤差磁場補正コイル, RWMC : 抵抗性壁モードコイル

真空容器内組立機器 (INVESSEL COMPONENTS)

EFCC
(Side)



EFCC
(Upper)



EFCC
(Lower)



EFCC

(口出し部のみ当社にて製作)
湾曲した形状, 約1t (3m x 1m)

真空容器内壁
(2020年6月時点)



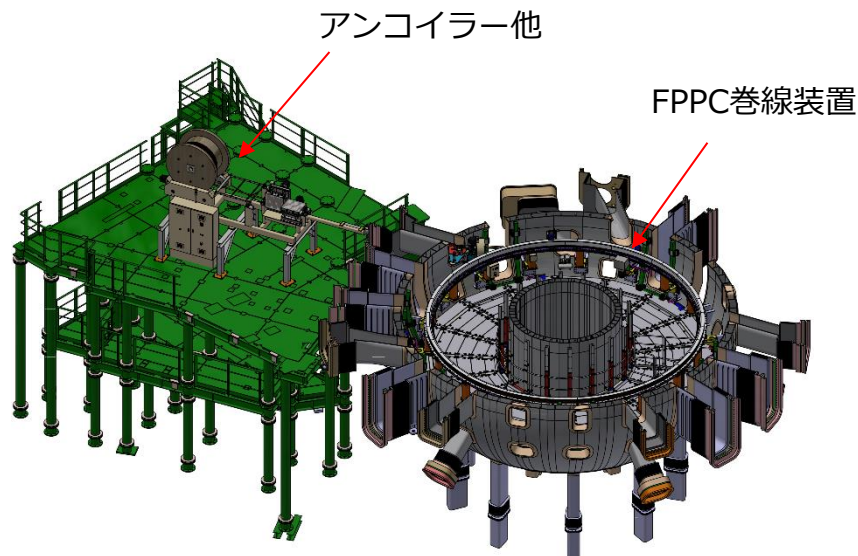
大きな流れは

- 1) 真空容器内座標系構築
- 2) 固定座設置・アライメント・溶接
- 3) EFCC搬入設置・アライメント

>> **ぜひどうやれば出来るかご想像下さい！**

(QSTさんのXに色々公開されてしまってますが・・・)

真空容器内組立機器 (INVESSEL COMPONENTS)



上FPPCコイル 絶縁硬化完了状態
(2025年1月, 真空容器内にて撮影)

★困難なポイント

①装置・治具設計

- >狭い真空容器内で巻線, 樹脂硬化, コイルケース組立
リード成型等を実施する。
- >別機器組立も輻輳できるような配置・構成も必要。
- >重量物の巻枠等の治工具類を搬入し, 容器内で一円化
・アライメントを行う。

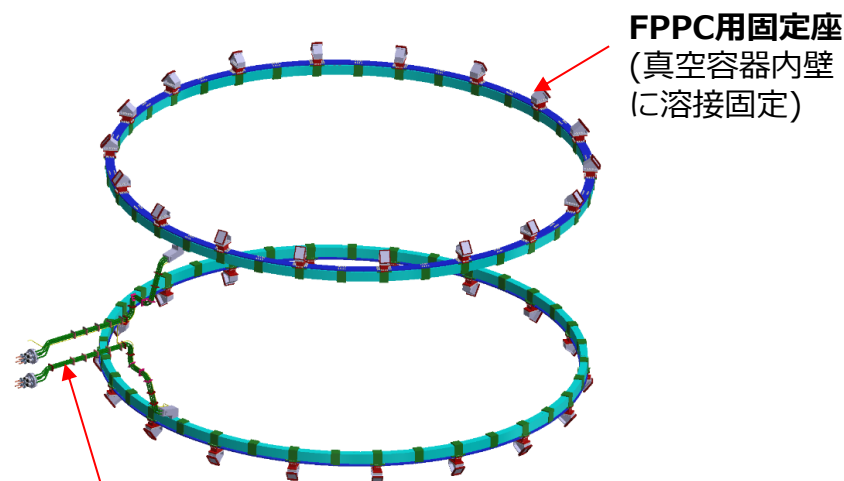
②絶縁材料(220℃の耐熱仕様)

- >絶縁材料の選定・評価試験も本工事内で実施済。

③コイルマテハン要領

- >真空容器内で組み上げたコイルの吊り・アライメント

④フィーダ(MIケーブル)の成形・接続・設置



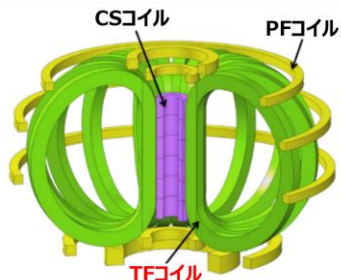
フィーダー(MIケーブル)

(FPPCコイル側は, 銅のホロー導体,
コイルケースから出た部分で, MIケーブルに
接続し直し真空容器外まで配線する)

原型炉への取り組み

Activity for JA Demo Reactor

原型炉設計合同特別チーム(オールジャパンの設計チーム)に発足時より参画し、大型超電導コイルの製作実績を基にした設計検討・提言活動を継続中



設計検討トピック

2016～：TF ラジアルプレート方式
矩形導体パンケーキ巻/レイヤー巻
2022～：CS
2023～：PF

学会発表 (QST殿と共著)

2021年 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) OR3-201-03

2023年 第105回低温工学・超電導学会, 3A-a05

2023年 29th IAEA Fusion Energy Conference, TEC/P1-35

2023年 第40回プラズマ・核融合学会年会, 29P36

2024年第15回核融合エネルギー連合講演会, 14P10

2024年 第41回プラズマ・核融合学会年会, 17P76

学術論文 (QST殿と共著)



Fusion Engineering and Design
Volume 202, May 2024, 114345



Design study of superconducting coil system for JA DEMO

Hiroyasu Utoh^a, Yoshiteru Sakamoto^a, Hideaki Miura^b, Hitoshi Arakawa^b,
Daisuke Echizenya^b, Takuya Matsuda^b, Mitsuru Hasegawa^b, Kazuhiro Nomoto^b

Show more

+ Add to Mendeley Share Cite

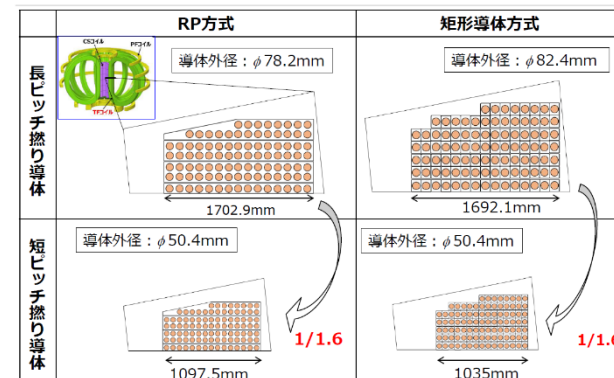
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114345>

Get rights and content

Highlights

- The design study of options for cost rationalization and the R&D required for larger coil sizes on JA DEMO is being carried out.
- Using "Hybrid R-shape" conductors offers the prospect of reducing insulation stresses in rectangular conductor layer winding concepts on JA DEMO.
- On the development of high-strength structural materials, the development target of yield strength > 1600 MPa and fracture

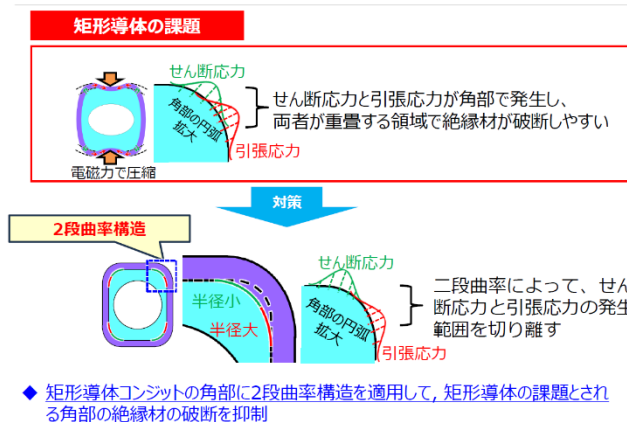
短ピッチ撚り導体を用いたTFコイルのコンパクト化



- 短ピッチ撚り導体を採用することにより、巻線断面を1/1.6にコンパクト化
- 原型炉導体サイズでも短ピッチ撚りが有効であることを実証するR&Dを提案

2020年 原型炉設計検討報告会(メーカ報告会)

2段曲率構造を用いた導体角部絶縁材の破断抑制



- 矩形導体コンジットの角部に2段曲率構造を適用して、矩形導体の課題とされる角部の絶縁材の破断を抑制

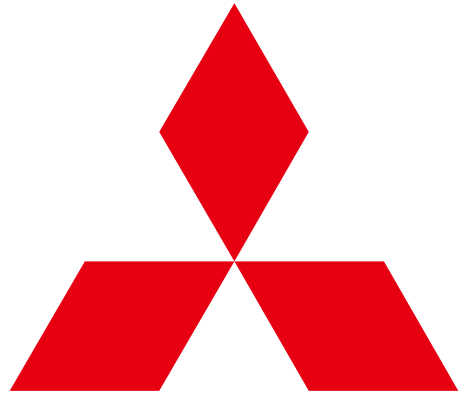
補足

JT-60SA CS 及び ITER-TF:Nb3Sn
JT-60SA EF: NbTi

1. 三菱電機では,
JT-60SA 中心ソレノイド(CS), 平衡磁場(EF)コイル
ITER トロイダル磁場(TF)コイル
の製作を通じ, 核融合実験用大型超電導コイル製作技術の開発/蓄積を行ってきました。
2. 現在,
JT-60SA増力工事において
容器内外の機器組立を担当し, 個々の組立技術開発を行いながら
2026年の運転開始に向け工事を進捗させています。

加えて, 原型炉特別チームの中で上記経験を活かした設計検討により
原型炉の早期実現に向け, 技術協力を行っています。
3. 今後,
核融合発電のサプライチェーンの一角として, 更なる価値向上を目指し
貢献してまいります。

(継続的に開発・設計が可能なように、案件創出をよろしくお願い致します！)



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better