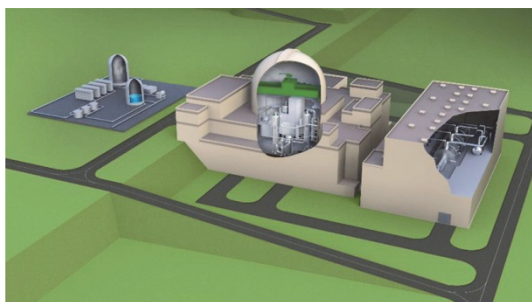


カーボンニュートラル達成に向けた原子力事業の取組み

Contribution to Carbon Neutrality by Nuclear Energy



神崎 寛*¹
Yurugi Kanzaki

西谷 順一*²
Junichi Nishitani

北川 敬明*²
Takaaki Kitagawa

原子力は、カーボンフリーかつ大規模・安定電源であり、エネルギーセキュリティの観点からも重要なベースロード電源であるため、我が国の 2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて、持続的に原子力を活用することは必須であると認識している。三菱重工業株式会社(以下、当社)は、国内既設プラントの再稼働や特定重大事故等対処施設(特重施設)の早期完工に向けて電力会社を全面的に支援するとともに、原子燃料サイクルの早期確立に向けた支援を行っている。また、これまで培った技術を活かして、世界最高水準の安全性を実現する革新軽水炉”SRZ-1200”, さらに、その先の多様化する社会ニーズに応えるべく様々な炉型の開発に取り組んでいる。本報では、我が国の 2050 年カーボンニュートラル達成に向けた当社の原子力事業の取組みについて述べる。

1. はじめに

世界的な気候変動問題への対応状況を踏まえ、日本では 2020 年 10 月に“2050 年カーボンニュートラル”を目指すことが宣言されている。脱炭素化の取組みを進めている中で、昨今のロシアによるウクライナ侵攻に伴う資源価格の高騰によって世界的にエネルギーセキュリティ上のリスクが顕在化し、国内でも今年 3 月に全国初となる電力需給ひっ迫警報が発令されるなど、電力安定供給の課題が浮き彫りになってきている。

脱炭素化とエネルギー安定供給の確保の両立が改めて重要な課題と位置付けられている中で、発電量が季節や気象条件に左右される再生可能エネルギー(太陽光発電, 風力発電)だけでは安定的な電力供給を維持することができない。これに対して、原子力は運転中に CO₂を排出せず、天候にも左右されない大規模・安定電源であり、再生可能エネルギーを補完するための調整能力も有している。当社は、これまで培った原子力技術をベースに将来のカーボンニュートラル達成と安定供給の両立に貢献するため、短・中・長期的な視点から取組みを推進している。

2. カーボンニュートラル達成に向けた原子力ロードマップ

原子力は技術的に確立したカーボンフリーかつ大規模・安定電源であり、エネルギーセキュリティの観点からも重要なベースロード電源であるため、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて原子力を持続的に活用することは必須である。一方、東日本大震災以降、国民の原子力に対する信頼は低下しており、その信頼回復が最重要課題と認識している。

当社は、国内唯一の PWR プラントメーカーとして、国内既設プラントの早期再稼働を目指して電力会社を支援し、これまで PWR 10 基の再稼働が実現している。引き続き、PWR プラントの再稼働や特重施設の早期竣工に向けて全面的に電力会社への支援を続けるとともに、先行知見を

*1 原子力セグメント 原子力技術部 部長

*2 原子力セグメント 原子力技術部 次長

活かして BWR プラントについても支援することにより、電力の早期安定供給の実現と脱炭素化へ貢献することで国民の信頼回復に努めていく。また、原子力を長期に亘って持続的に活用していくためには、原子燃料サイクルの確立が必要であり、当社は原子燃料サイクルの早期確立に向けて主幹会社として全面的な支援を継続していく。

将来のカーボンニュートラル達成と電力安定供給に貢献するため、当社は 2030 年代半ばの実用化を目指し、これまで培った実績のある(ブルーブンな)技術をベースに革新的な技術を導入することによって安全性を高め、世界最高水準の安全性を実現する革新軽水炉“SRZ-1200”の開発を推進している。さらに、その先の多様化する社会ニーズに応じて、小型軽水炉、高温ガス炉、高速炉、マイクロ炉といった将来炉についても開発を進めていくとともに、2050 年以降の長期的な視野に立って、恒久的な“夢のエネルギー源”である核融合炉の開発にも挑戦していく(図 1)。

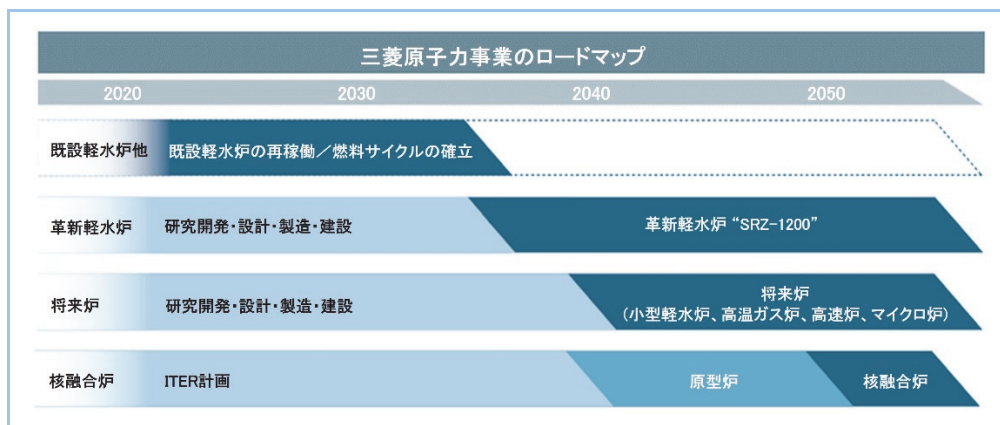


図1 カーボンニュートラル達成に向けた当社原子力事業の取組み

3. 既設プラントの再稼働支援/燃料サイクルの確立

2030 年に温室効果ガス排出量 46%削減の前提となっている原子力比率 20~22%を達成するためには、多くの既設プラントの再稼働が必要である。当社は、震災後に制定された新規規制基準への適合を図るべく、国内既設プラントの安全対策工事について総力を挙げて電力会社を支援し、これまでに PWR プラント 10 基の再稼働が実現している。2021 年 6 月には、運転開始から 40 年を超える原子力発電所として国内では初となる美浜 3 号の再稼働が実現し、特重施設設置工事については、2022 年 10 月時点で国内 PWR プラントのうち 7 基が完工済みである。また、当社は PWR プラントメーカーではあるが、原子力の信頼回復に向けて PWR プラントだけではなく、BWR プラント向けの安全対策工事/特重施設設置工事についても支援している。

さらに、再稼働を果たしたプラントについては、継続的な安全性向上に向けた評価や最新知見/技術を取り入れた保全対策を実施するとともに、運転期間 60 年の長期安定運転を見据えて、蒸気発生器や炉内構造物の取替え工事などの大型保全工事を計画的に実施することによって、原子力プラントの長期間にわたる安全・安定運転に貢献していく。

また、原子力発電所の使用済み燃料を再処理し、回収されたプルトニウム等を MOX 燃料として再利用することにより、ウラン資源を有効に活用するとともに、高レベル放射性廃棄物の減容化、有害度低減が可能となる。当社は、原子燃料サイクルの確立に向け、日本原燃株式会社が青森県六ヶ所村に建設中の再処理工場、及び MOX 燃料加工工場の早期竣工に向けて、主幹会社として各種対策工事等を推進している。

4. 革新軽水炉 “SRZ-1200”

SRZ-1200^{*1} は、ブルーブンな技術をベースに高い経済性を確保するとともに、革新的な技術や最新知見を取り入れて安全性を高めた中型炉(電気出力 120 万 kWe 級)であり、PWR4電力^{*2}と共同で SRZ-1200 の基本設計を進めている。

SRZ-1200 は、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた新規規制基準をベースに、設計段階から安全対策を講じることが可能な新設炉ならではの特徴を活かし、自然災害に対する耐性の強化、新たな安全メカニズムとしてパッシブ設備である高性能蓄圧タンクやコアキャッチャの導入に加え、万一の重大事故時に放出される放射性物質の量を低減する放射性物質放出防止システムの採用等により、世界最高水準の安全性を実現する(図2)。

- *1 SRZ-1200 S:Supreme Safety(超安全), Sustainability(持続可能性)
R:Resilient(しなやかで強靱な)light water Reactor(軽水炉)
Z:Zero Carbon(CO₂排出ゼロ)で社会に貢献する究極型(Z)
(1200は電気出力120万kW級を表しています。)
- *2 北海道電力株式会社, 関西電力株式会社, 四国電力株式会社, 九州電力株式会社

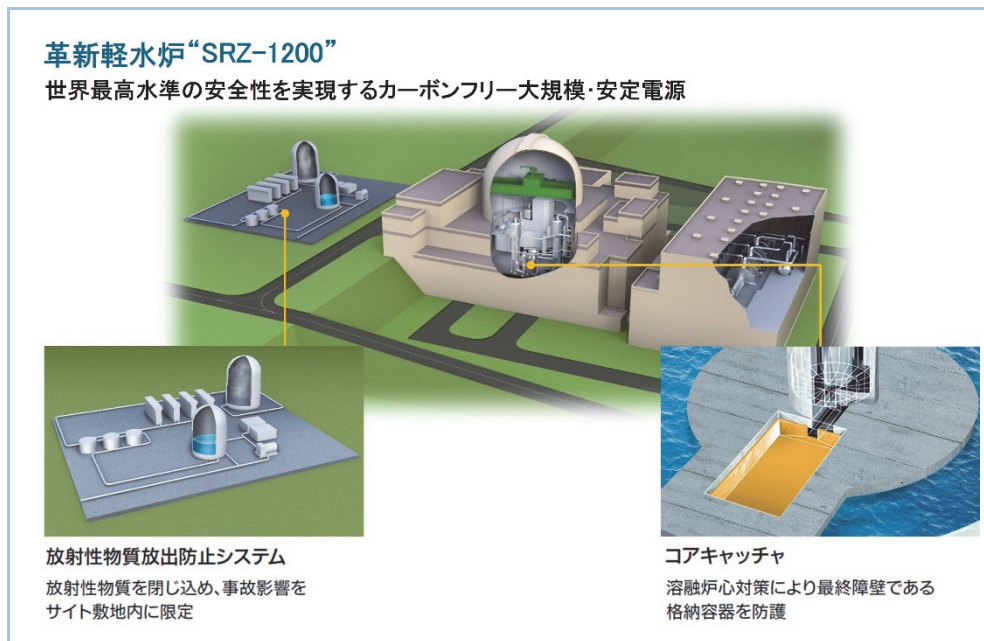


図2 革新軽水炉“SRZ-1200”

SRZ-1200 の主な特徴は次の通りである。

(1) 地震・津波・その他自然災害への耐性強化

強固な岩盤に建屋を埋め込むことで耐震性を強化し、国内の厳しい地震条件にも余裕を持った耐震設計。津波影響を受けない敷地高さ(ドライサイト設計)を採用。また、建屋頑健化や火山灰侵入防止対策等により、その他の外部事象(台風や火山等)に対する耐性についても大幅に強化

(2) 炉心冷却・格納容器閉じ込め機能強化

国内の新規制基準に適合した新しい安全設計。多重性・多様性の強化等により、世界最高水準の安全性・信頼性を実現。電源を必要とせず、プラントの状態に応じて自動作動するパッシブ設備(高性能蓄圧タンクの採用など)と、電源駆動により安全機能を強力に発揮するアクティブ設備のベストミックスにより、事故初期の迅速な対応と速やかな事故収束を両立

(3) 溶融炉心対策

万一の炉心溶融(シビアアクシデント)時にもデブリを専用設備(コアキャッチャ)に捕捉、冷却・保持し、最終障壁である格納容器を防護

(4) 放射性物質放出防止

万一の格納容器からのベント操作が必要な事態に備え、フィルターベントシステムに加えて、ベントガス中から放射性希ガスを除去する放射性物質放出防止システムを導入し、放射性物質の大量放出を防止して事故影響を発電所敷地内に限定

(5) セキュリティの強化(テロ対策)

鋼製格納容器と強靱化した外部遮蔽壁の二重格納構造の採用等により、大型航空機衝突

(APC: Air Plane Crash)耐性を強化。最新デジタル技術を活用したサイバーセキュリティ強化
 (6) 再生可能エネルギーとの共存

再生可能エネルギーの拡大に伴う夜間・荒天時等の出力変動や電力系統不安定化等の課題に対して、出力調整機能(周波数制御、負荷追従)を強化。さらに、余剰電力を活用した水素製造にも適用可能

5. 将来炉・核融合炉

5.1 小型軽水炉

近年、脱炭素化に向けて分散電源としての小型軽水炉が注目されている。当社は、将来の多様化するニーズに応えるため、小規模グリッド向けのカーボンフリー電源として、2040年頃の市場投入を目指して電気出力約30万kWeの小型軽水炉を開発している。当社の小型炉開発は、2000年代から一体型モジュール炉(IMR: Integrated Modular water Reactor)の小型軽水炉開発を通じて小型軽水炉特有の要素技術の実証を行ってきた。さらに、2019年度から経済産業省のNEXIP(Nuclear Energy×Innovation Promotion)イニシアチブの下で、これまでの知見も踏まえ革新的な小型軽水炉の開発を行っている。

小型軽水炉は、蒸気発生器等の主要機器を原子炉容器に内蔵する一体型原子炉構造の採用により、主要機器を接続する主冷却材配管を不要とする。また、原子炉内の炉心領域で加熱された冷却材と蒸気発生器で除熱された冷却材の密度差を駆動力に利用して、一次冷却材を自然循環させ、冷却材ポンプを不要とする。これらにより、主冷却材配管破断に伴う冷却材喪失や、ポンプ故障等による事故発生を原理的に排除する。原子炉で想定される事故への対処設備については、事故時に動的機器を使用しないパッシブ安全システムを積極的に採用し、運転員操作や外部電源/水源を不要とする。また、原子炉や安全対策設備等を配置した建屋等を地下に埋設することで、航空機衝突等への外部ハザードへの耐性を強化する。さらに、万一の想定外の重大事故に対しても、二重格納構造により放射性物質の閉じ込め機能を強化しており、これら革新的なコンセプトにより、従来プラントに比べ更なる安全性・信頼性の向上の実現を目指している(図3)。

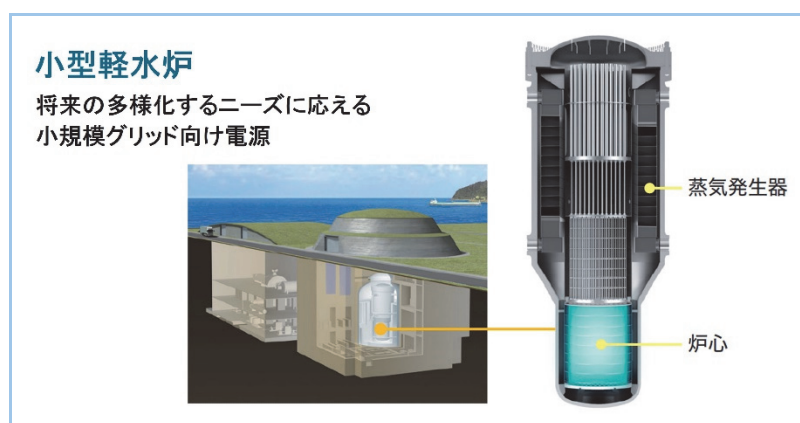


図3 小型軽水炉

5.2 高温ガス炉

カーボンニュートラル達成に向けて、電力部門における脱炭素化に加えて、産業・民生・運輸(非電力)部門においても脱炭素化が不可欠である。脱炭素化に向けて、鉄鋼、化学製品のような分野では水素を還元剤や原料として用いることが検討されており、水素利用の技術開発が進められているが、その実現には大規模かつ安定的な水素供給が必要となる。

高温ガス炉は、900℃以上の核熱利用を特徴としており、高温ガス炉によるカーボンフリー高温熱源を利用して大量かつ安定的な水素製造を行うことにより、鉄鋼業界をはじめとした産業分野の脱炭素化へ貢献できる。また、高温ガス炉の特徴として、炉心・燃料の構成材に耐熱性の高い

黒鉛(減速材)や SiC のセラミック材料(燃料被覆)を、核熱を取り出す冷却材に化学的に安定なヘリウムガスを用いており、万一の事故時にも炉心内の熱を原子炉外面から自然に放熱、除去することができ、炉心溶融を起こさない“固有の安全性”を有している。

当社は、1970年代から高温ガス炉開発に携わり、国内唯一の高温ガス炉である日本原子力研究開発機構(JAEA:Japan Atomic Energy Agency)の試験研究炉 HTTR(High Temperature engineering Test Reactor)の建設に主幹会社として参画している。これらの知見を活用して、2019年度から経済産業省の NEXIP イニシアチブのもと、2040年頃の実用化を目指して、炉心出力最大 600MWt の高温ガス炉による高温の熱源(950℃)を利用して、年間数十万トン規模の水素製造が可能なプラントシステムの開発を進めている(図4)。また、2022年4月から、JAEAと共同で高温ガス炉を活用した水素製造技術の実証事業を開始しており、既存のHTTRに水素製造施設(水蒸気改質法)を新たに接続し、高温ガス炉から得られる高温熱を活用した水素製造接続技術の実証を行う計画である。カーボンフリー水素製造技術については、産業技術総合研究所と共同で、高温ガス炉の超高温の核熱利用により効率的に水蒸気を電気分解して水素製造する、高温水蒸気電解技術の開発にも着手している。このように高温ガス炉を活用した水素製造技術については、まずは早期実用化に向けて技術成熟度の高い水蒸気改質法を適用して核熱を利用した水素製造を実証し、将来に向けては高温水蒸気電解やメタン熱分解といったカーボンフリー水素製造技術を適用することにより、大規模且つ安定的なカーボンフリー水素製造の実現を目指していく。

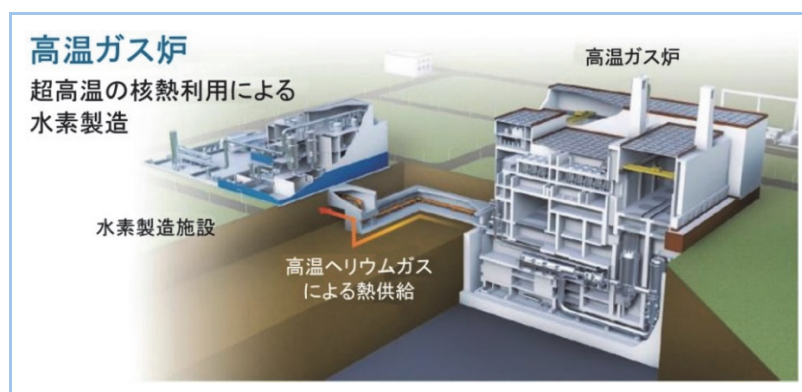


図4 高温ガス炉

5.3 高速炉

高速炉は、中性子を減速させる水(減速材)を用いず、高速状態の中性子によるプルトニウムの核分裂反応を利用した原子炉である。燃料の増殖や原子力発電所の使用済み燃料の再処理後に回収される、マイナーアクチニド(MA:Minor Actinide)と呼ばれる寿命の長い放射性物質を燃焼することも可能であり、これらを再度燃料として装荷して半減期の短い放射性廃棄物に変換することができる。国は、これらの高速炉の特性を踏まえ、資源の有効利用や高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、原子燃料サイクル政策として高速炉開発を推進していく方針を示している。

当社は、1970年代から実験炉“常陽”，原型炉“もんじゅ”の開発、建設等の国家プロジェクトに参画し、2007年に国の高速炉開発の中核企業に選定されて以降、最も実績があるMOX燃料ナトリウム冷却高速炉の開発を推進している。また、経済産業省の NEXIP イニシアチブにおいて、高速炉利用の多様性拡大に向けて、安全性・信頼性を高めた小型ナトリウム冷却高速炉の開発にも着手している(図5)。国が推進する国際協力においても、日本の高速炉開発の中核企業として、日仏国際協力によるタンク型炉の開発への参画のほか、2022年1月には JAEA らとともに米国テラパワー社が開発するナトリウム冷却高速炉の実証炉開発への技術協力に合意している。21世紀半ばまでの早い段階で次期高速炉の運転開始を目指し、国際協力で得られる知見も活

用して国内の厳しい地震条件などを考慮した日本独自のプラント概念を開発し、クリーンエネルギーの長期安定供給に貢献していく。

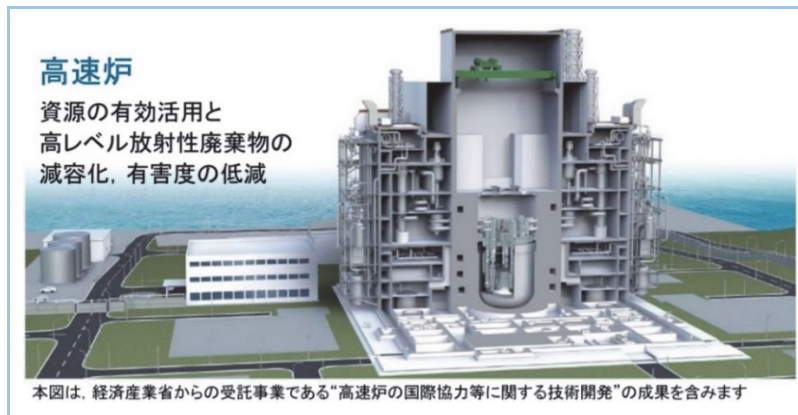


図5 ナトリウム冷却高速炉

5.4 マイクロ炉

送電網が整備されていない離島や僻地、マイクログリッド等での電源利用などを目的とした、多用途モジュール式マイクロ炉の開発を行っている。マイクロ炉は、小型軽水炉よりも更に出カレベル・サイズが小さい炉であり、金属系材料に比べて密度が小さい黒鉛系材料を炉心構造物に適用して原子炉の軽量化を図るとともに、炉心を小型化することで輸送用コンテナ内に原子炉系・発電系をすべて収納可能なポータブル原子炉である。さらに、燃料取換え作業不要な長寿命炉心を実現するため、ウラン濃縮度 20%を上限とした HALEU (High-Assy, Low-Enriched Uranium) 燃料を採用している(図6)。

また、安全性の追求のため、原子炉冷却材に液体や気体を使用せず、高熱伝導体を用いた“全固体原子炉”の概念を採用し、冷却材喪失事故の要因を根本から排除し、環境に対する放射線影響を低減させることが可能となる。仮に事故が発生した場合でも、もともと出力が小さく、高熱伝導の黒鉛系材料採用しているため、空気自然冷却のみで安定的に崩壊熱除去が可能となる。



図6 マイクロ炉

5.5 核融合炉

核融合エネルギーは、世界のエネルギー問題解決や地球温暖化対策に貢献できる潜在能力を有している。当社は、世界7極(日本, 欧州, 米国, ロシア, 中国, 韓国, インド)の国際協力で行われている国際核融合実験炉“ITER”計画に参加し、2025年ファーストプラズマに向けて高度な詳細設計・製造技術を活かして主要機器の製作等を行っている。2020年1月には世界に先駆けて、世界最大規模の超伝導コイルであるトロイダル磁場コイルの初号機を完成させている(図7)。トロイダル磁場コイル以外では、プラズマ閉じ込めに欠くことができない不純物を排出、除去するための機器であるダイバータの製作も開始している。

また、ITER計画と並行して進められている核融合原型炉を早期に実現することを目指した国際

活動“Broader Approach(幅広いアプローチ)”にも参画している。国内の原型炉開発は、国の原型炉研究開発ロードマップに沿って進められており、当社は、これまで培ってきた核融合装置設計、製造技術を活かし、原型炉向けプラズマ閉じ込め真空容器の概念検討や核融合超伝導トカマク型実験装置“JT-60SA”向けの高周波加熱装置用機器の製作にも取り組んでいる。

今後も世界の持続的発展のため、重要な技術開発に取り組む ITER 計画を積極的に支援するとともに、原型炉開発にも取り組み、核融合エネルギーの実現に向けて貢献していく。

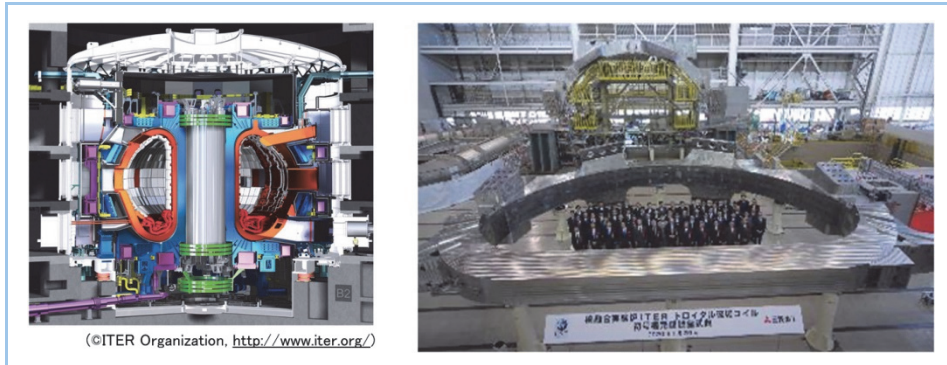


図7 ITER向けトロイダル磁場コイル初号機の完成披露式典

6. まとめ

当社は、軽水炉から燃料サイクル、廃止措置に至るまであらゆる分野を手掛ける原子力総合メーカーとして、50年以上の実績とたゆまぬ革新を続け、原子力プラントの安全・安定運転に貢献してきた。

原子力はカーボンフリーかつ大規模・安定電源であり、資源の少ない日本において、エネルギーセキュリティの観点からも重要な電源である。気候変動問題に対する意識がますます高まり、エネルギー安定供給が喫緊の課題となる中で、原子力は、将来の脱炭素化とエネルギー安定供給を両立する切り札であり、2050年カーボンニュートラルの達成に向けて、当社は引き続き原子力技術で貢献していく。