

令和4年7月7日(木)
第14回核融合エネルギー連合講演会

核融合エネルギー実現に向けた 日本の研究開発戦略

稲田 剛毅

文部科学省 研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)



文部科学省

MEXT

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

あと50年で実用化と言われ続けて50年。

(1955年の第1回原子力平和利用国際会議から起算すると65年だが…)



核融合発電はいつになったら実用化できるのか？

核融合エネルギーの段階的研究開発

- 核融合エネルギーの実用化に向けて、ITER計画等への参画を通じて科学的・技術的実現性を確認した上で、原型炉への移行判断を行っていく。
- 文部科学省では、「核融合原型炉開発の推進に向けて」、「原型炉研究開発ロードマップ」（科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会）等を踏まえ、原型炉に必要な技術開発の進捗を定期的にチェックアンドレビューしつつ、研究開発を推進。

現在取り組んでいる段階

科学的・技術的実現性

技術的実証・
経済的実現性

実用
段階

科学的実現性

臨界プラズマ条件の達成

- ・燃焼プラズマの達成・長時間燃焼の実現
- ・原型炉に必要な炉工学技術の基礎の形成

- ・発電実証
- ・経済性の向上

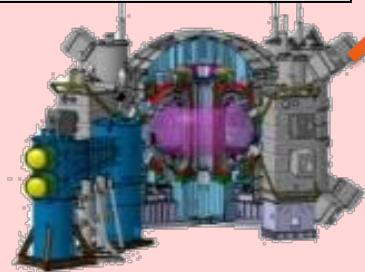
21世紀中葉までに
実用化の目処



JT-60
(JAEA)



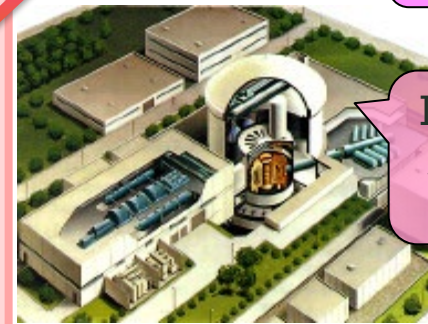
ITER (実験炉)
(仏、カダラッシュ (ITER機構))



JT-60SA (茨城県那珂市)
(量子科学技術研究開発機構)



国際核融合エネルギー研究センター
(青森県六ヶ所村)
(量子科学技術研究開発機構)



原型炉

ITERで核融合反応
が見込まれる2030
年代に移行判断

学術研究



LHD
(大型ヘリカル装置)
(核融合科学研究所)



GEKKO XII号、LFEX
(大型レーザー装置)
(阪大レーザー研)

ITER計画

補完
支援

幅広いアプローチ活動

そもそもあと50年って現実的な話？

飛行機を例にとると…

紀元前5世紀頃 古代ギリシアの学者アルキタスが、蒸気で推進する鳥形飛行体を製作。

1490年頃 レオナルド・ダ・ヴィンチが、航空機のスケッチを作成。

1811年 独の発明家アルブレヒト・ベルプリンガーが、ハンググライダーを製作。公開飛行に失敗。

1899年 英の発明家パーシー・ピルチャーが、三葉機を製作。試験に至らず。

1901年 奥の発明家ヴィルヘルム・クレスの水上機が離水に失敗。

1903年 ライト兄弟初飛行



1969年 アポロ11号月面着陸



技術的成立性が示され、適切な資源が投入されれば、
相当に困難な課題も解決可能！

核融合発電について世界の状況を分析すると…



永遠に続くかと思われた、50年先の実用化に向けた
カウントダウンは開始されている!?

各国における核融合研究開発の動向

核融合はエネルギー問題と環境問題を根本的に解決することから、カーボンニュートラル実現の鍵となるエネルギー源。これまで、世界7極35か国による国際協力を実施してきたITER計画が順調に進捗していることを受け、主要国はカーボンニュートラルの実現に向けて、**核融合エネルギー開発に関する各国独自の取組みを2020年頃から一斉に加速**。国際競争の様相に突入している。また、米国ではバイデン政権下において更なる加速も見込まれる。併せて、各国において**核融合ベンチャーへの投資も活性化**。

政策動向の変化

- 欧州連合関連機関（EUROfusion）が策定した「核融合エネルギー実現に向けた欧州研究ロードマップ」（2018年）において、22世紀に世界で1テラワット（100万kW発電所 1,000基分）の核融合発電所が必要と記載。フォンデアライエン欧州委員長（2019年発足）の「欧州グリーンディール」政策の下で核融合は推進され、2020年5月-11月に3段階による中間評価を行い、**2050年頃に発電を行う核融合原型炉（DEMO）を建設**すべきと評価。
- 米国エネルギー省（DOE）の核融合エネルギー科学諮問委員会（FESAC）が、「核融合エネルギーとプラズマ科学に関する10年間の国家戦略計画」を発表（2021年2月）。**2040年代までに核融合パイロットプラント（発電炉）を建設するための準備を整え**ると記載。全米科学アカデミーは、**2028年までに実施判断し、2035～2040年に発電を目指す**と提言（2021年2月）。**安全規制**について、原子力規制委員会（NRC）を中心に検討を開始。
- 英国は、ジョンソン首相による新政策「グリーン産業革命に向けた10項目の計画」（2020年11月）、「英国政府の核融合戦略」（2021年10月）において、**2040年までに核融合原型炉の建設を目指す**と明記。発電炉の立地地域を募集し、5つの候補地を公表（2021年10月）。政府の規制政策諮問会議による今後の**核融合規制に関する勧告**（2021年5月）に対し、**政府が核融合規制に関する討議資料（グリーンペーパー）を公表**（2021年10月）し、意見募集を実施（パブリックコメントに相当）。
- 韓国政府（国家核融合委員会）が策定した「第4次核融合エネルギー開発振興基本計画（2022-26）」（2021年12月）において、**2050年代に核融合電力生産実証炉（K-DEMO）による発電実証を行う**という目標を設定するとともに、安全規制について、**2024年までに核融合規制体系の基本的な方針を策定**すると記載。
- 中国においても、国産の核融合発電実現に向け、イーターと並行して、イーターと同規模の**核融合工学試験炉（CFETR）を1基建設**した後、これを2030年代までに**発電炉（原型炉）に改造**する計画を推進中。



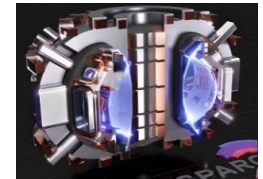
目的	核融合エネルギー実現を加速させること		
目的	"核融合エネルギー実現を加速させること"		
目的	核融合エネルギー実現を加速させること		
目的	核融合エネルギー実現を加速させること		
目的	核融合エネルギー実現を加速させること		

核融合ベンチャーへの投資活性化

諸外国において、核融合ベンチャーの数および投資額が増加中

- マサチューセッツ工科大学で設立されたCommonwealth Fusion Systems社は2021年12月に2050億円以上の追加資金調達を公表(累計2200億円以上)。2025年に核融合実験炉を稼働させることを目指す。
- カナダのGeneral Fusion社も2021年11月に140億円以上の追加資金調達を公表(累計330億円以上)。英国原子力公社(UKAEA)とFusion Demonstration Plant を英国内に建設するための協定を締結(2021年6月)。

General Fusion (加)



Commonwealth Fusion systems (米)

米国における核融合研究開発の動向

米国における「核融合エネルギーの実用化に向けた大胆な10年後のビジョン策定」と題する会合の概要（ホワイトハウス ファクトシート）

- 3月17日、米国連邦政府は、大統領府科学技術政策局（OSTP）、エネルギー省（DOE）の共催により、「核融合エネルギーの実用化に向けた大胆な10年後のビジョン策定（Developing a Bold Vision for Commercial Fusion Energy）」と題する会合を開催。
- 同会合には、グランホルムDOE長官、マッカーシー大統領補佐官（気候変動担当）他、政府高官が出席。
- 同会合では、バイデン政権は、核融合をクリーンエネルギーの潜在的なゲームチェンジャーと認識しているとした上で、
 - 「商業核融合エネルギーの実現を加速するための10年戦略」（decadal strategy to accelerate the viability of commercial fusion energy）を、民間セクターとの連携の下で、DOEが策定すること（今後数か月間ワークショップを開催）
 - 核融合エネルギーの商業化に向けた競争は激化しており、今こそ動きを加速させるべき時であること
 - DOEは 首席核融合調整官（Lead Fusion Coordinator）を新設すること
 - この戦略は米国のITER計画への参加を活用し、核融合エネルギーの開発をさらに加速させるための新たな国際協力の可能性を模索させること（explore new international collaborations）等が宣言された。



英国における核融合研究開発の動向

2021年10月、英国政府（ビジネス・エネルギー・産業戦略省、BEIS）は、「英国政府の核融合戦略：核融合エネルギーに向けて」と題する文書を発表。

英国政府の核融合戦略（2021.10）

■ 戦略の背景

戦略策定の背景として、本年は英国がCOP26議長国であること、英国政府は電力システムの完全な脱炭素化を目指していることに触れつつ、「核融合技術の実証と商業化に成功すれば、将来の世界のエネルギー市場に持続可能な低炭素のベースロード電力を供給できる」との期待を表明している。

■ 戦略の目的

1. 電力網へのエネルギー投入を行う核融合発電原型炉を建設することにより、核融合の商業的実現性を英国として実証する。
2. 英国が世界をリードする核融合産業を構築し、その後の数十年間に核融合技術を世界に輸出できるようにする。

■ 戦略の主な内容

- 核融合に関する規格・規制の策定を先導し(※)、安全性を確保しつつ核融合の可能性と市場機会を創出すると共に、イーターに対する貢献とEUの核融合発電原型炉プログラムへの参画を継続する。

※本戦略と同時に、英国政府（BEIS）は、「核融合エネルギーに関する規制枠組みに関する英国政府提案」という文書を公表し、年末を期限に意見公募を開始した。

- 「球状トカマク（STEP）」プログラム【注】により、2040年までに、電力網へのエネルギー投入を行う核融合発電原型炉を設計・開発・建設する。2022年12月までに英国政府（BEIS）が立地地域を選定する。

【注】本戦略にはSTEP自体に関する記述はない。BEISが過去に公表したSTEPに関する情報を見ても技術的な詳細は記載されていない。引き続き調査が必要。

- 英国に活力ある核融合技術クラスターを創出し、核融合及び関連技術に関する対英投資を誘引する。サプライチェーンを確立し、世界の核融合市場(※)で競争力をもつ英国企業を育てる。

※英国政府は将来の市場規模を年間約520～1670億ポンド(約8～25兆円)と見積り。



STEPイメージ図 (出典：UKAEA)

韓国政府の核融合政策

2021年12月、韓国政府（国家核融合委員会）は、「第4次核融合エネルギー開発振興基本計画」を決定。この中で、韓国として「核融合電力生産実証炉」により2050年代に発電実証を行うという目標を設定。

韓国「第4次核融合エネルギー開発振興基本計画」（2021.12）

■ 基本計画の背景

韓国政府（国家核融合委員会：関係省庁で構成）は、核融合エネルギー開発に関する政策目標や基本的な方向性を示す基本計画を、5年毎に策定している。

■ 基本計画の特徴

今回の第4次基本計画は、イーターによる核融合運転成功（2035年を予定）を前提としつつ、韓国独自の「核融合電力生産実証炉」の構想を具体化した点が特徴。

■ 基本計画の主な内容

（1）核融合電力生産実証炉

- ・韓国として「核融合電力生産実証炉」により2050年代に発電実証を行うという目標を設定。2022年までに基本概念を、2023年までに長期ロードマップを策定。イーターによる核融合運転成功（2035年を予定）が実証炉建設の前提。

（2）核融合コア技術の確保

- ・核融合発電の実証に必要なコア技術群を8つ提示（コイル、ブランケット、ダイバータ等）。これらをイーターや国内実験装置（KSTAR）などを通じて確保。
- ・このうち核融合エネルギーを電気に変換する重要装置「ブランケット」については、技術的に先行するEUとの協力で開発。

（3）その他

- ・核融合関連法制度整備のため、核融合戦略支援センター（仮称）を設置。
- ・核融合の安全性に関し、「核融合規制体系の基本的な方向性」を2024年までに策定。
- ・核融合に対する産業界の参画を拡大するため核融合技術産業協議会（仮称）を設置。

世界の核融合政策を顧みて、
日本の状況はどうかというと…



日本における核融合研究開発の最新の動向

イーターの組立据付開始（2020年）など技術の成熟や、カーボンニュートラルに向けた政策的要請の高まりを踏まえ、主要国（米英EUなど）が核融合への取組を加速中。我が国でも、核融合推進が一つの政策的論点に。

■岸田文雄の政策—経済政策—（令和3年9月8日）

再生可能エネルギーの最大限の導入は当然のこととして、蓄電池、新型の小型原子炉、ITER（核融合）、水素融合、自動車の電動を推進、カーボンリサイクルなど新たなクリーン・エネルギーへの投資を積極的に後押し。

特に、ITER（核融合エネルギー）について、国家戦略を策定。

■令和3年 自民党政権公約

・大胆な「成長投資」で、確かな未来を拓く。

究極のグリーン・エネルギーである核融合（ウランとプルトニウムが不要で、高レベル放射性廃棄物が出ない高効率発電）開発を国を挙げて推進し、次世代の安定供給電源の柱として実用化を目指します。

■第208回国会 岸田内閣総理大臣施政方針演説（令和4年1月17日）

送配電インフラ、蓄電池、再エネはじめ水素・アンモニア、革新原子力、核融合など非炭素電源。需要側や、地域における脱炭素化、ライフスタイルの転換。資金調達の在り方。カーボンプライシング。多くの論点に方向性を見出していきます。

直近の政策文書における核融合に関する記載

第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月閣議決定）

◇第2章 Society 5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策

1. 国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革

(2) 地球規模課題の克服に向けた社会変革と非連続なイノベーションの推進

(c) 具体的な取組

② 多様なエネルギー源の活用等のための研究開発・実証等の推進

○ 現在見直しに向けた議論が進められている「エネルギー基本計画」等を踏まえ、省エネルギー、再生可能エネルギー、原子力、核融合等に関する必要な研究開発や実証、国際協力を進める。

第6次エネルギー基本計画（令和3年10月閣議決定）

6. 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた産業・競争・イノベーション政策と一体となった戦略的な技術開発・社会実装等の推進

<「グリーン成長戦略」における成長が期待される14分野>

⑦ 原子力産業

（略）また、核融合エネルギーの実現に向け、国際協力が進められているトカマク方式の ITER 計画や幅広いアプローチ活動については、サイトでの建設や機器の製作が進展しており、引き続き、長期的視野に立って着実に推進するとともに、技術の多様性を確保する観点から、ヘリカル方式・レーザー方式や革新的概念の研究を並行して推進する。

経済団体提言書における核融合エネルギーの位置付け

■ (一社) 日本経済団体連合会 (経団連)

提言書『新成長戦略』(令和2年11月)

5. グリーン成長の実現

(3) 脱炭素化と経済性を両立する原子力の活用

脱炭素社会の実現を追求するうえで、原子力は欠くことのできない手段である。福島第一原子力発電所事故の教訓を活かし、最新の科学的知見を踏まえて安全確保を確固たるものとするを大前提に、原子力を継続的に活用していく必要がある。(中略)

将来を見据え、軽水炉の安全性向上につながる技術はもちろんのこと、安全性に優れ経済性が見込まれる新型原子炉(例: SMR※、高温ガス炉、核融合炉等)の開発を推進することもきわめて重要である。脱炭素社会の早期実現を目指し、2030年までには新型炉の建設に着手すべく、国家プロジェクトとして取り組みを進める必要がある。

※Small Modular Reactor。小型モジュール炉。

提言書『Society 5.0 with Carbon Neutral 実現に向けた電力政策

電力システムの再構築に関する第二次提言』(令和3年3月)

将来像の実現に向けた環境整備

原子力: 安全最優先の継続的活用

(前略) 中長期的な原子力利用の観点からは、既存の大型軽水炉のほか、より安全性等に優れた新型炉活用の可能性も模索すべきである。例えば小型モジュール炉(SMR)や高温ガス炉、より長期を見据えた核融合炉等の研究開発を、国家プロジェクトとして推進することが重要である。なお、脱炭素燃料としての水素の需要が大きく拡大すると考えられるなか、軽水炉や高温ガス炉を活用した水素製造の可能性にも注目が集まっている。利用シーンの拡大も視野に、将来の原子力利用のあり方を検討していくべきである。

■ (公社) 経済同友会 (同友会)

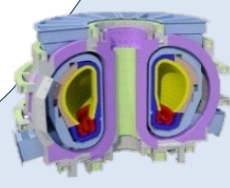
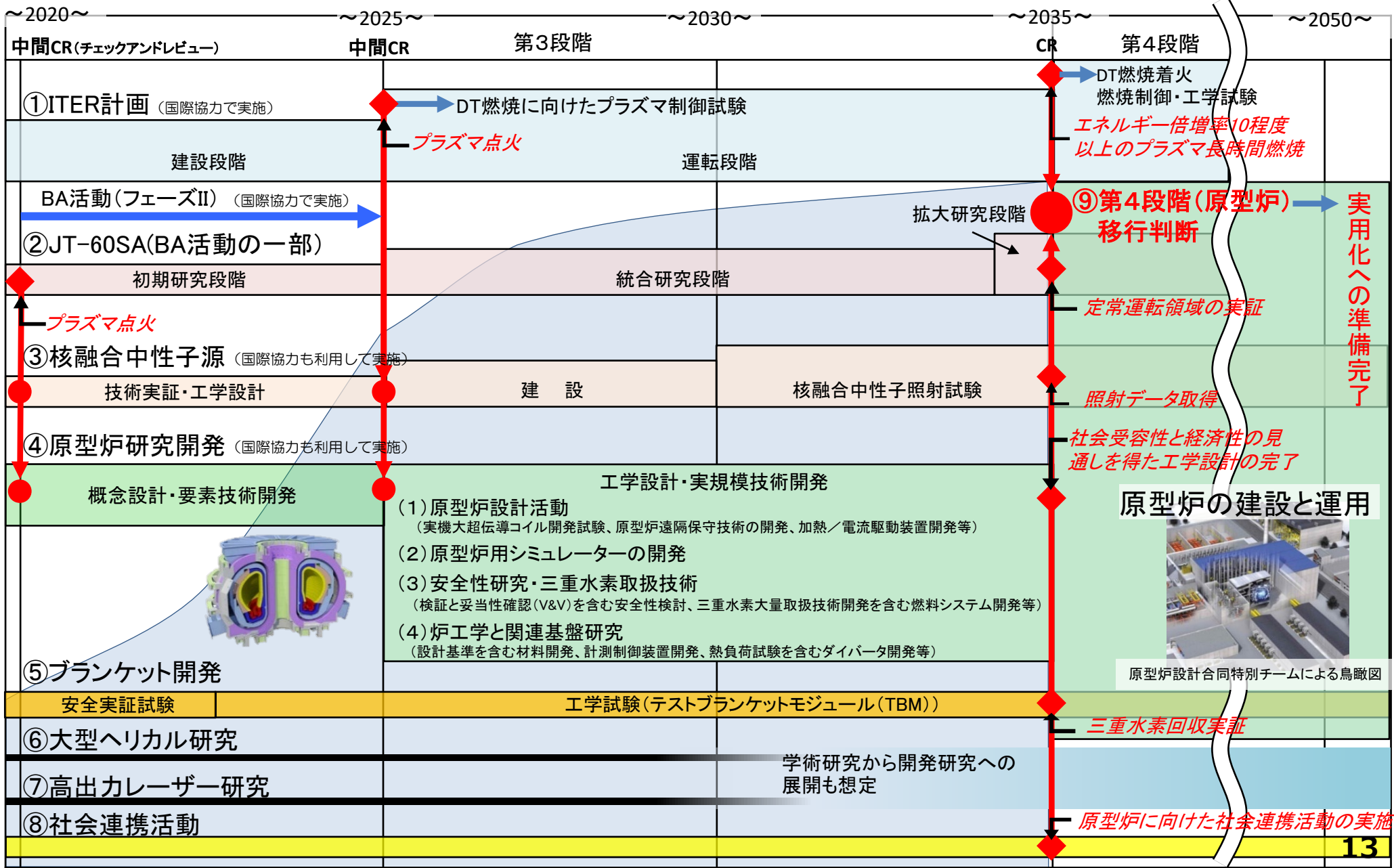
提言書『「エネルギー基本計画」見直しに関する意見』(令和3年3月)

おわりに

- エネルギーミックスは、技術の進展や社会・経済状況、産業構造によって大きく左右される。長期的な需給見通しを明確に示し、技術開発や投資を促す一方、あらゆる事態を想定し、複数の選択肢を用意していく必要がある。その意味で、再生可能エネルギーのみならず、ゼロエミッション電源としての原子力、火力の高効率化、省エネや蓄エネの推進などバランスを取りながら進めていくとともに、水素やアンモニア等の革新的技術や、核融合炉などのムーンショット技術にも挑戦していく必要がある。

原型炉研究開発ロードマップ

- ◆ 目標達成が求められる時点 ▲ 達成すべき目標
- 次段階への移行判断が求められる時点
- ロードマップ遂行に必要なアクティビティの指標



原型炉設計合同特別チームによる鳥瞰図

原型炉開発の技術基盤構築を進めるための体制

核融合科学技術委員会

- ・原型炉開発に向けた技術基盤構築のための体制整備について
- ・トカマク方式以外の核融合研究の在り方について
- ・原型炉開発ロードマップの策定

政策提示・評価

活動方針提示・
各要素技術の状況把握

情報共有・要請等

公募テーマの提案・了承

原型炉概念設計

原型炉合同特別チーム

@QST六ヶ所研究所

QST, NIFS, 大学, 企業

- ・関連学協会と連携しつつ、原型炉概念に必要な様々な技術要素の基盤構築を目指す

原型炉開発総合戦略TF

- ・原型炉開発に向けたアクションプランの策定
- ・原型炉設計合同特別チーム等の進捗状況の把握・助言等
- ・技術基盤構築の進捗状況及び課題解決への取組の取りまとめ

原型炉に向けた共同研究

共同研究ワーキンググループ

TF, QST, NIFS, 大学, 特別チーム

- ・原型炉研究開発体制強化のための大学等の連携強化

連携

アクションプランの策定・承認

核融合開発に係る研究開発政策の検討状況

2017年12月

➤ 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」策定

➤ 「原型炉開発アクションプラン」改訂

※科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会

2018年7月

➤ 「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」策定

※科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会

原型炉段階への移行に向けた考え方

➤ ITERの核融合運転(DT)が見込まれる2030年代に原型炉移行判断

➤ 原型炉段階移行時に、実用炉段階で経済性を達成できる見通し

➤ 中間チェックアンドレビューを2回に分けて実施(CR1、CR2)

#CR1 JT-60SAの運転開始の頃に、実施予定。

核融合科学技術委員会(第10期) 令和元年度 アクションプランの進捗状況確認

令和2年度 第10期における進捗評価の取りまとめ

CR1に向けた検討

核融合科学技術委員会(第11期) 令和3年度 CR1を実施

#CR2 ITERのFPから数年以内(2025年以降)

*原型炉工学設計・必須のコンポーネントの工学開発活動開始も判断

➤ 産業界の意見を踏まえ、また主要国の政策動向を注視しつつ対応

核融合原型炉研究開発に関する第1回中間チェックアンドレビュー報告書(概要)

令和4年1月24日、科学技術・学術審議会の核融合科学技術委員会(主査:上田良夫大阪大学教授)は、核融合原型炉に向けた研究開発に関する第1回チェックアンドレビュー報告書を取りまとめた。概要以下の通り。

目的

- 核融合科学技術委員会が、その傘下にある原型炉開発総合戦略タスクフォース(TF)による進捗状況調査結果を踏まえて、我が国における核融合原型炉研究開発の進捗状況を分析し、原型炉段階への移行に向けての技術の成熟度を確認するもの。
- 委員会文書においては、原型炉建設の判断に先立ち、2回の中間チェックアンドレビュー(CR)を行うこととしている。今回は第1回中間チェックアンドレビュー(CR1)であり、第2回中間チェックアンドレビュー(CR2)は、イーターのファーストプラズマ達成後を目途に行うこととされている(2025年以降)。
- 委員会文書においては、CR1段階において達成すべき目標(最大の目標は、原型炉概念設計の基本設計の完了)が設定されており、この目標の達成状況を確認することが基本である。

CR1までに達成すべき目標(平成29年12月核融合科学技術委員会決定)の概要

- 原型炉概念設計の基本設計
- ITERの技術目標達成計画の作成
- ITER超伝導コイルなど主要機器の製作技術の確立 等

報告書のポイント

- 実効的なフォローアップを行うために策定された「原型炉開発に向けたアクションプラン」に基づき、原型炉TFで研究開発の進捗状況を確認したところ、CR1段階までの研究開発は「おおむね順調に推移している」と評価された。これに基づき、委員会として確認した結果、**CR1までの目標は達成されている**と判断した。
- 他方で、**CR2に向けた課題**も列挙。主な課題は次の通り。
 - ・将来の原型炉開発に生かすため、**イーター向けに日本が調達責任を負う機器の開発加速**が急務。
 - ・原型炉、すなわち核融合発電を実現するために不可欠な**基幹技術の確保**に速やかに取り組むべき。
 - ・**核融合発電の実現時期の前倒しが可能か**検討を深めること。前倒しを行う場合、CR2時点での達成目標や、原型炉研究開発の優先順位を再検討すること。(CR1の実施後、内外の情勢を見極めながら1年程度をかけて慎重に検討。)
 - ・核融合に必要な**技術開発から学術研究まで**幅広く取り組み、核融合に必要な**広範な人材を育成・確保**するとともに、丁寧に社会の理解を得ながら、着実に歩を進めていくこと。
 - ・核融合の重要性に対する関心喚起による**産業界の連携を促進し、産学官のステークホルダーが結集して取り組む**ことが重要
 - ・**立地や安全**について議論を深めていくこと。

※ここには、**文部科学省傘下の審議会での検討事項を越える課題**も含まれる。幅広い関係機関による今後の議論において、**16**核融合科学技術委員会での審議結果をインプットし、議論の深まりに貢献していく。

核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について

▮▶ 長期的な計画に基づき、原型炉開発を担う人材を継続的・安定的に育成・輩出し、その人材を確保し、さらに育成する環境整備が必要

大学院教育

博士課程学生を増加させるため、学術研究を推進し、基礎研究環境の維持・充実が必要

▶▶ 広範で多様な専門を習得する教育プログラムの構築や、ものづくりやシステム統合を経験するための産学の連携

人材流動性

ITER計画・BA活動と国内研究開発を連携させ、知の循環システムとして発展させることが必要

▶▶ ITER機構を含む、産学で広範囲な人材流動性構築と、魅力的なキャリアパスの確立

アウトリーチ

子供を含む広い世代に対する、核融合研究開発への興味喚起と相互理解が必要

▶▶ 即戦力・将来の人材の確保、並びに核融合の社会受容性向上の観点から、アウトリーチなどの社会連携活動

日本も核融合発電に向けた
国際競争の本格参加の準備はできつつある。



まとめ

世界的な競争が開始される中、原型炉を実現し、核融合エネルギーの実用化を目指すために、

➤ ITER計画、BA活動の着実な遂行

- ITER計画におけるFP、DTの達成
- BAフェーズⅡ(2020年4月以降)の本格運用 (IFMIF/EVEDA、IFERC、JT-60SA)

➤ 中長期的視点に立ち、原型炉を見据えた研究開発・人材育成の展開

- 原型炉段階への移行判断に向けた、チェックアンドレビューの実施
- 産学官が一体となり、人材流動性を確保した人材育成
- 戦略的なアウトリーチ活動の展開・体制整備



御清聴、ありがとうございました。

