変わり始めた日本の核融合推進計画

1. 世界トップレベルに達した中国
2. 政府有識者会議資料（2024/3/29）で見えた方向性の変化

1）日本の開発ロードマップ

前作ビデオ「核融合も中国か」復習

文科省2018年発表　https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm

2）世界の開発計画

前作ビデオ「核融合も中国か」復習

欧州（EU）

日欧協力で原型炉設計を進めている。
ロードマップも日本と同様。ただし原型炉設計は双方独自。
実現性を重視した堅実な設計。

米国

商業炉の実現を加速するための10年戦略の策定を宣言（2022年3月）。
1990年代のQ=1失敗（日欧に敗北）以後、磁場方式では存在感なし。
国内研究の維持のための小型炉戦略。

英国

国家核融合戦略を発表（2021年10月）。2040年代に発電炉の建設を目指す。
Q=1を達成したJETの後継機は日本のJT-60SAに統合され、ITERも仏で困っている。
国内研究の維持のための小型炉戦略。「再び英国を偉大に」が合言葉。

先行しているかにみえるが、
実は、米英は周回遅れ組。

前作ビデオ「10年後に実用化できるは本当か」を参照

中国

ITER完成までは世界最大

原型炉研究設備CRAFTを建設済。日本のJT-60SAと同規模の試験炉BESTを中国内に
2027年までに建設し、2030年代までに発電炉（原型炉）CFETRを実現する計画を推進中。
具体的で堅実な王道を、大きな予算を付けて進む。

3）中国の開発計画　非常に堅実で現実的。

前作ビデオ「核融合も中国か」復習

中国は、「ITER建設で得た知見で原型炉の建設には十分」との考え。 *ITERのQ=10を待たない！*

ITERの成功を待たないで、ITER完成後、すぐにも原型炉を建設を推進し、2030年代に運用開始

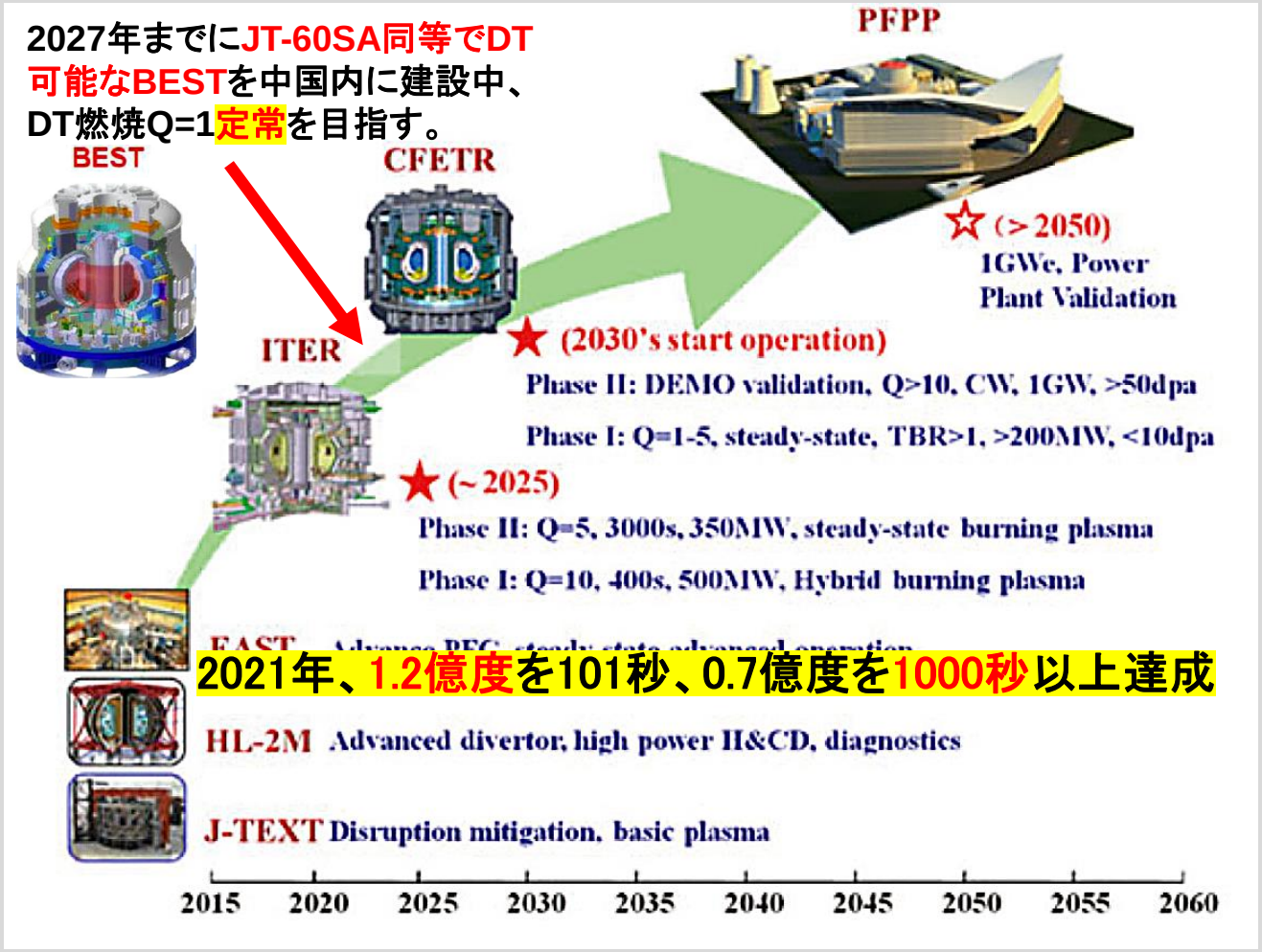
原型炉工学研究のために、1000億円*かけた研究設備CRAFTを設置済。計画は順調。

*日欧共同で2010から10年間で出した原型炉予算に匹敵

BEST（右図上参照）も建設中。
原型炉CFETRには数兆円規模だろう。

中国の戦略は一貫している。
小型炉に興味を示さないのは、本気の証拠。

王道を行く中国が、この分野で先行するのは時間の問題ではないか。

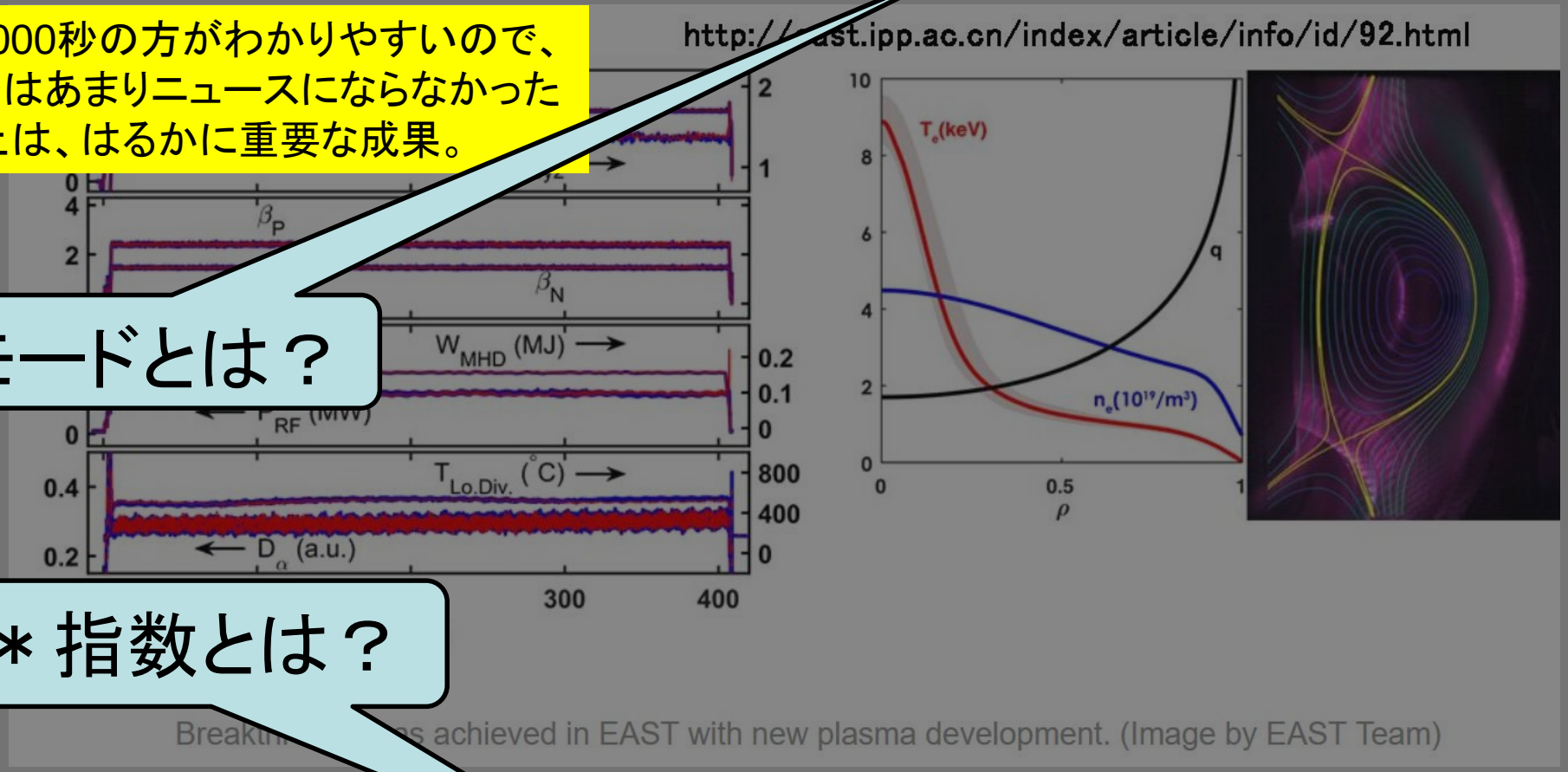


CFETRの設計: https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/fec2018-preprints/preprint0216.pdf
図は、Yuanxi Wan et al.: "Overview of the present progress and activities on the CFETR", Nuclear Fusion, Vol.57, 102009 (17pp) (2007) による。

Institute Of Plasma Physics Chinese Academy Of Sciences, Hefei （安徽省合肥）
前作ビデオ「核融合も中国か」復習
CRAFT
BEST
予定地
CRAFTは2018年12月から建設を開始し、2022年4月に完成。
予算規模は1000億円
https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202204/t20220412_304060.html

5）2023年の中国の重要成果　EASTがHモード403秒。世界トップレベルに立った。

1億度や1000秒の方がわかりやすいので、この403秒はあまりニュースにならなかったが、研究上は、はるかに重要な成果。



Hモードとは？

＊＊指数とは？

2021年の1000秒や1億度の成果は、「低密度・低圧力」と多少は批判する余地はあった。
2023年のHモード403秒のデータは、閉込め指数R=1.35、圧力指数G=1.5、密度指数R=0.8と、ITERに必要な条件をほぼ同時達成してのHモードの403秒維持。これは世界トップレベル。

Hモードの発見

Hモードなしには**ITER**にも実用炉にも進めなかっただろう

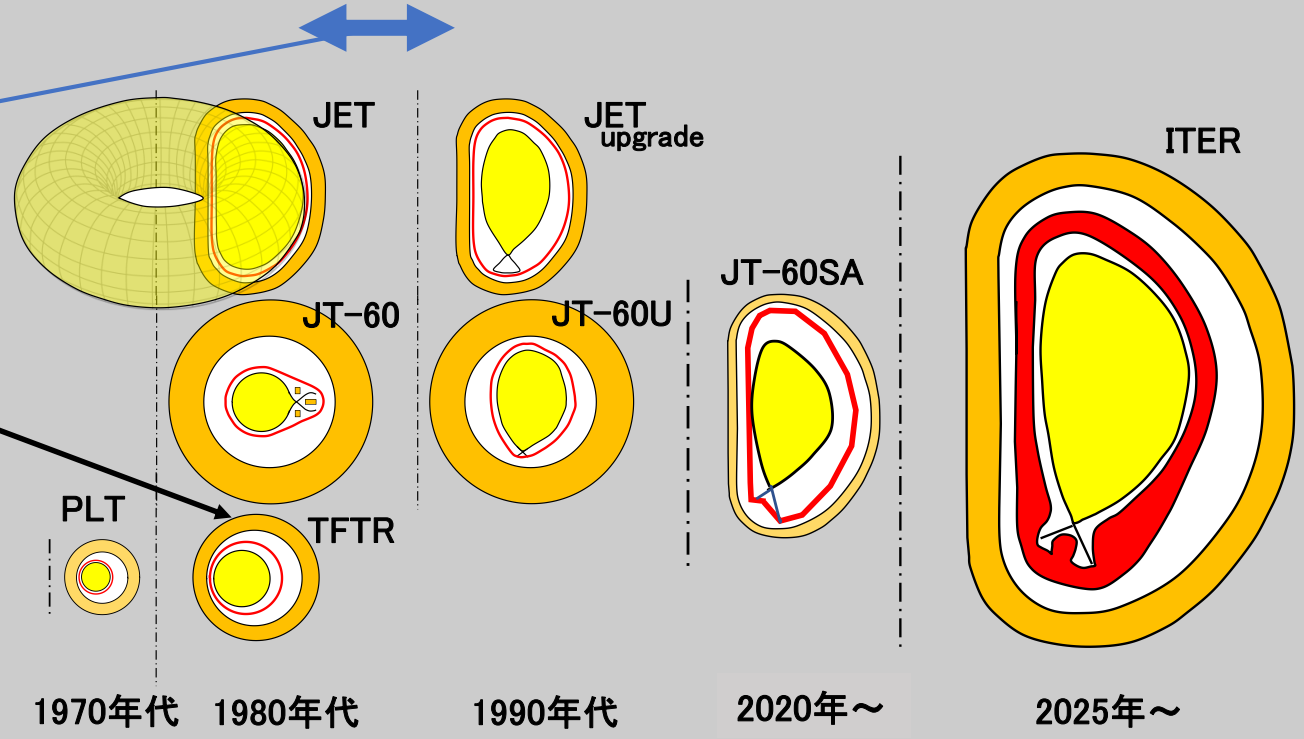
Highモード（Hモード）

1980年ころ、3大装置 JT-60, JET, TFTR の3機種とも上下対称で建設中だった。
1982年、3機の完成目前に、上下非対称な下付きダイバータによって閉じ込め性能が2倍というHモードをドイツの装置が発見。

JETは大型D型コイル採用、JT-60は横ダイバータのために円形ながらコイルが大きかったため、両機とも上下非対称に改造でき、それによって、Hモードによる**Q=1**を達成。

強磁場で小型化を狙ったTFTRは、Hモードに向けた改造の余地がなく、**Q=0.3**に終わり、廃炉された。

Hモードがなければ、トカマクは、ITERにも実用化にも進めなかった可能性が高い。



Hモードの解説記事
核融合のブレークスルーのカギは余裕を持った設計だった（2022/02/28）
https://ieei.or.jp/2022/02/expl220228/

プラズマ性能の制約条件

特に重要な３つの指標

エネルギー閉じ込め時間

魔法瓶でいえば、お湯が冷めるまでの時間性能

⇒ ITERや実用炉でも「秒」のオーダー

プラズマ継続時間 とは異なる

魔法瓶でいえば、水が漏れてなくなるまでの時間

⇒ ITER初期目標300秒、実用炉では無限（定常運転）

① エネルギー閉じ込め指数 H

ITERはH=1.0

ITERの何倍まで出せるかの指標

② プラズマ圧力指数 G

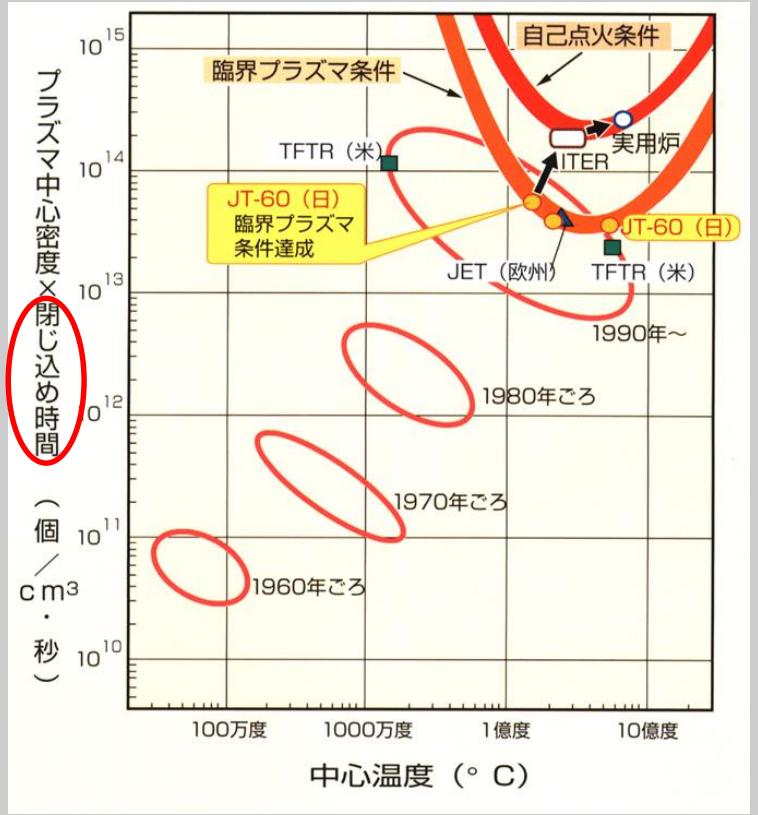
ITERはG=1.8

どれくらいの圧力のプラズマを安定に維持できるかの指標

③ プラズマ密度指数 R

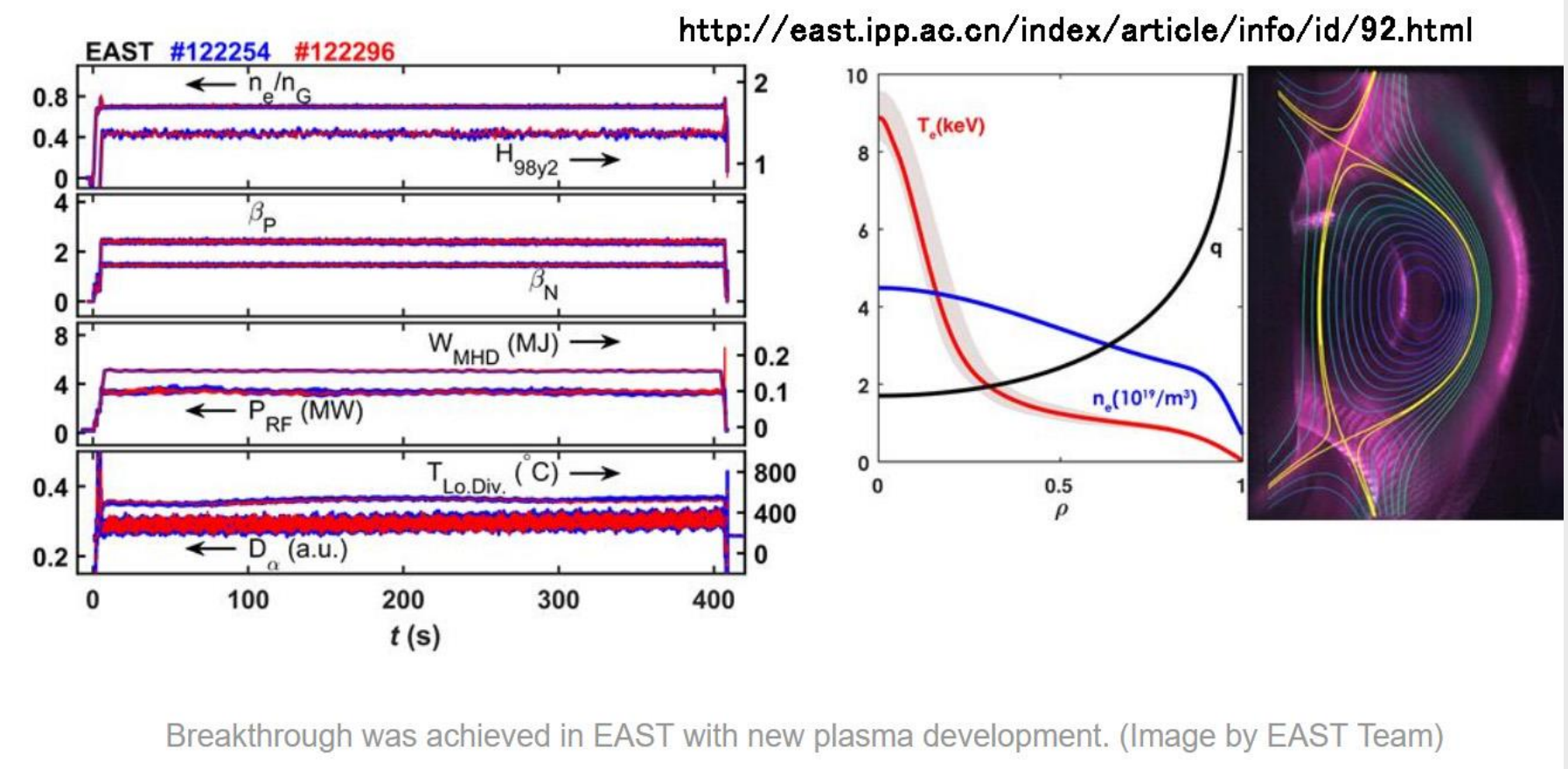
ITERはR=0.8

どれくらいの密度を安定に維持できるかの指数



図は量子科学技術研究開発機構提供

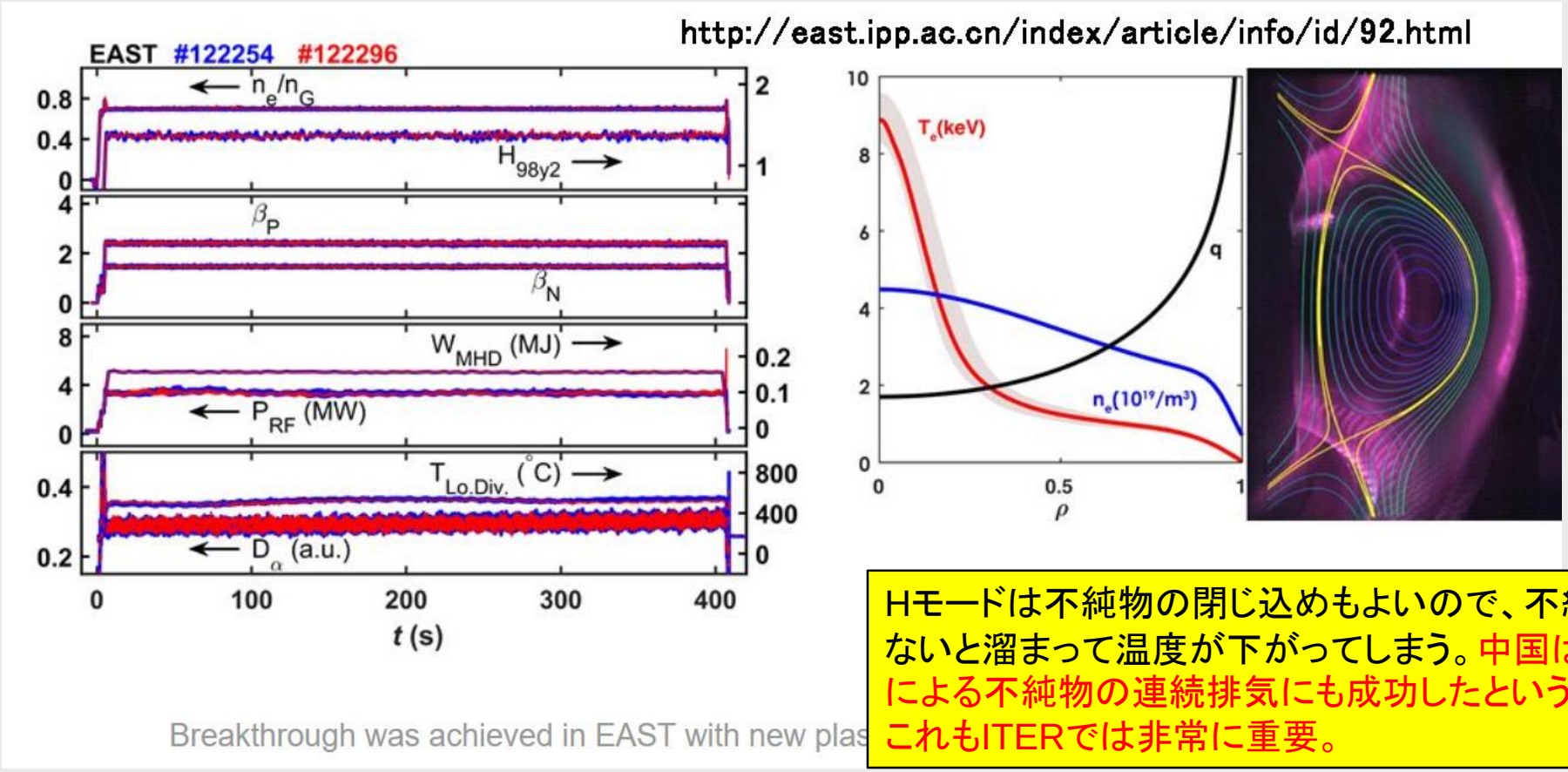
5）2023年の中国の重要成果　EASTがHモード403秒。世界トップレベルに立った。



Breakthrough was achieved in EAST with new plasma development. (Image by EAST Team)

2021年の1000秒や1億度の成果は、「低密度・低圧力」と多少は批判する余地はあった。
2023年のHモード403秒のデータは、閉込め指数H=1.35、圧力指数G=1.5、密度指数R=0.8
と、ITERに必要な条件をほぼ同時達成してのHモードの403秒維持。これは世界トップレベル。
H=1.0, G=1.8, R=0.8

5）2023年の中国の重要成果　EASTがHモード403秒。世界トップレベルに立った。



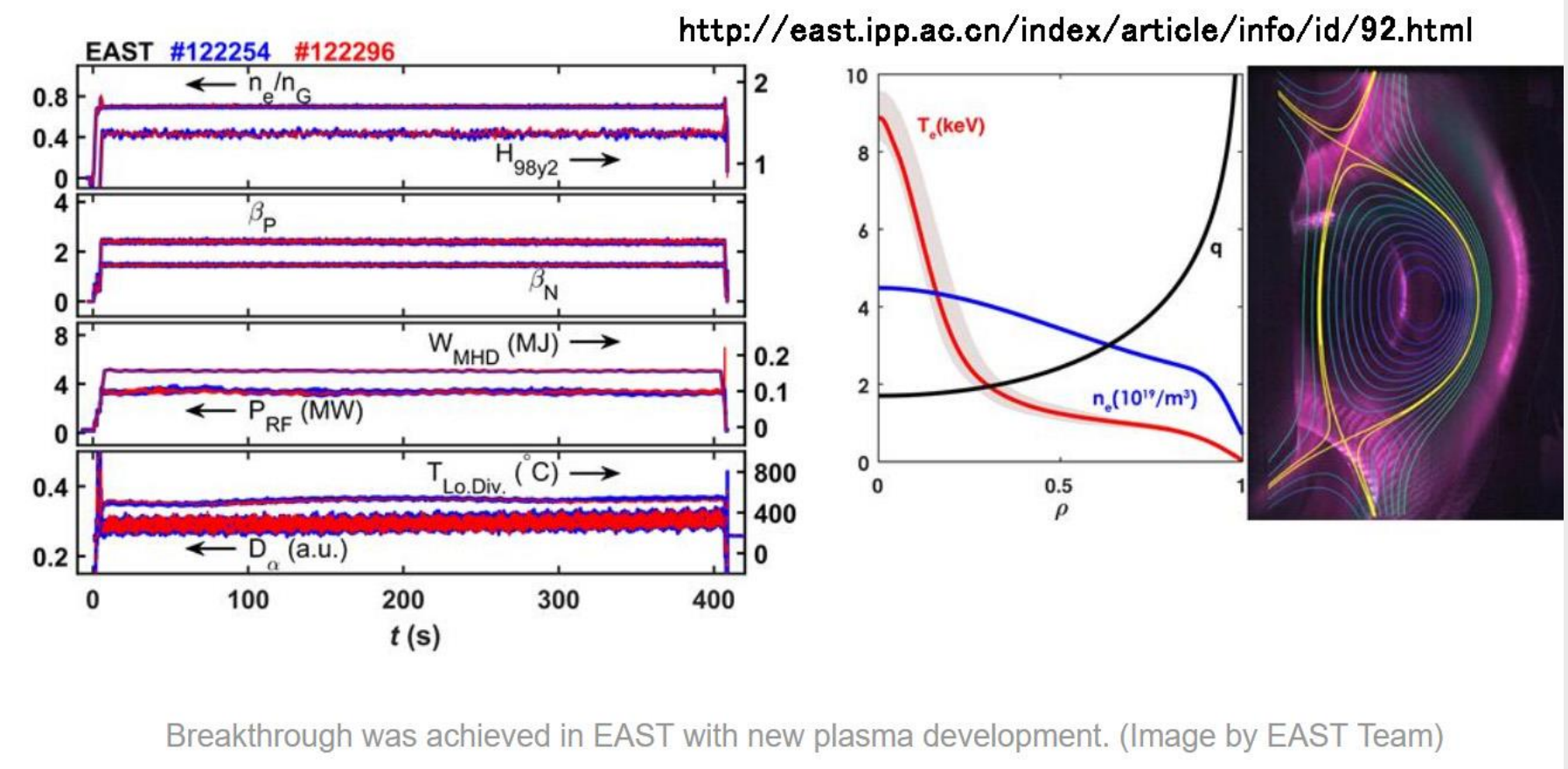
Hモードは不純物の閉じ込めもよいので、不純物を排気しないと溜まって温度が下がってしまう。中国はダイバータによる不純物の連続排気にも成功したということ。これもITERでは非常に重要。

2021年の1000秒や1億度の成果は、「低密度・低圧力」と多少は批判する余地はあった。
2023年のHモード403秒のデータは、閉込め指数H=1.35、圧力指数G=1.5、密度指数R=0.8と、ITERに必要な条件をほぼ同時達成してのHモードの403秒維持。これは世界トップレベル。

H=1.0, G=1.8, R=0.8

JT-60UもJETも同時達成はできたが、超伝導装置ではなかったので、Hモード継続時間は10秒のオーダー

5）2023年の中国の重要成果　EASTがHモード403秒。世界トップレベルに立った。



Breakthrough was achieved in EAST with new plasma development. (Image by EAST Team)

日本のJT-60SAなら、さらに高密度、高圧力のHモードを目指せる。
ただし、設計上、最長100秒なので、秒数では中国の403秒を超えられない。
主に加熱装置の電源容量によるので、追加予算で電源を強化すれば、
403秒を超えることも可能ではないか。

変わり始めた日本の核融合推進計画

1. 世界トップレベルに達した中国
2. 政府有識者会議資料（2024/3/29）で見えた方向性の変化

2023年4月の政府記載と、
Youtube（杉山・岡野）https://cigs.canon/videos/20240125_7836.html （2023年12月）で示した意見

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略

令和5年4月14日
内閣府　統合イノベーション戦略推進会議

実は周回遅れの米・英のみ

こちらの方がずっと重要

P.4

諸外国においては民間投資が増加している6。その活況な民間投資を受け、米国や英国等のフュージョンスタートアップは、これまでの政府の計画よりも早い野心的な発電時期を目標7に掲げ、研究開発競争を加速している。また、中国においては政府主導で実験装置や原型炉の建設に向けた計画8を強力に進めており、今後、研究開発競争の脅威となりうる。

6 Fusion Industry Associationの調査によると、2021年までに約$2Bの民間投資がなされており、今後さらに約$2.7Bの民間投資が行われる予定。

7 米国Commonwealth Fusion Systems：2025年に実験炉SPARC、2030年代初期に商用炉ARCの稼働。英国Tokamak Energy ：2030年代早期にパイロットプラントST-E1、2030年代中期に商用炉の稼働。米国 TAE Technologies ：2030年代初期に商用炉の稼働。英国政府（英国原子力公社UKAEA）：2040年代までにプロトタイプ炉STEPを稼働。

8 2025年から要素技術の獲得のための施設群CRAFTの運転、2027年から実燃料による運転も計画している実験装置BESTの運転、2030年代までにITERと同規模の工学試験炉を建設し2050年代に発電炉に改造を予定。

中国が原型炉を日本より早く造る、と書きたくなかったと推察する

核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料3

https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/6kai/6kai.html

2024年3月29日の政府最新資料を見ると、雰囲気が変わり始めているのがわかる

資料3
核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日

フュージョンエネルギーの早期実現に向けて
～フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の加速～

内閣府

科学技術・イノベーション推進事務局

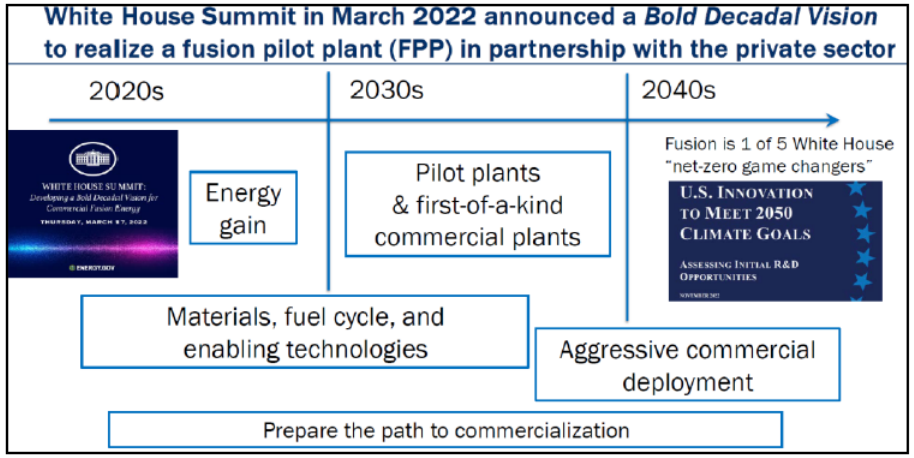
核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料3

米国からは始まるが・・・

各国におけるフュージョンエネルギーに関する最近の取組

<米国>

- 2030年代終わりまでにパイロットプラントの運転を開始するため、Public-Private Partnershipsでスタートアップ８社に対し、合計46ミリオンドルを措置。
  スタートアップには「America First」ポリシーにより、米国内調達を課している。
- 2023年4月、米・原子力規制委員会(NRC)は、核融合施設を原子力施設(核分裂)の規制とは異なり、加速器等に適用する規制を基にする方針を公表。
  2024年秋に、規則の改訂提案をNRCに提出予定。



Bold Decadal Visionにおけるタイムライン

採択されたスタートアップ８社

核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料3

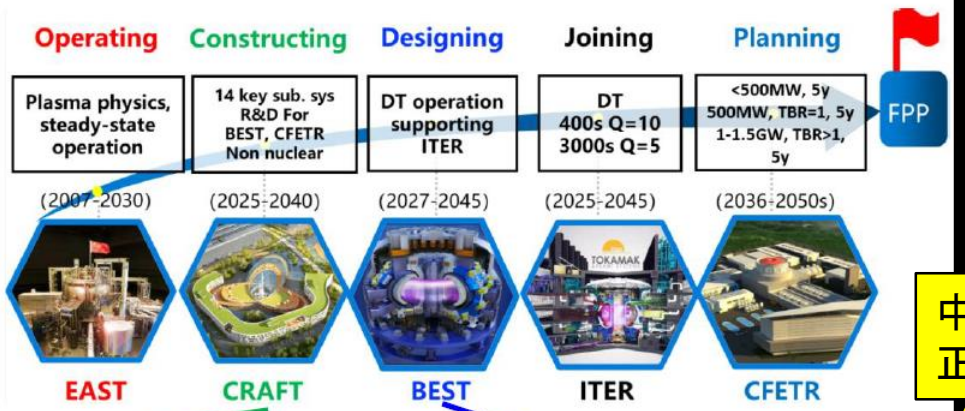
各国におけるフュージョンエネルギーに関する最近の取組

中国が2番目になった

<中国>

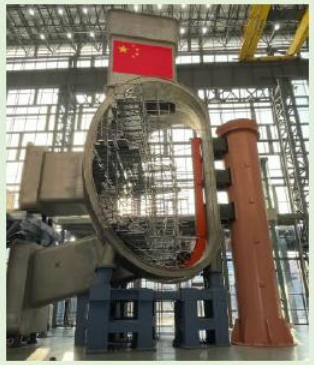
表現が変わった

- 2050年代の発電実証に向け、圧倒的な予算を投じ、政府主導で計画を進めている。
- 2023年12月、核融合技術開発に焦点を当てた、国営企業25社によるコンソーシアム「中国核融合エネルギー社」を設立。



中国に実力を正当に評価

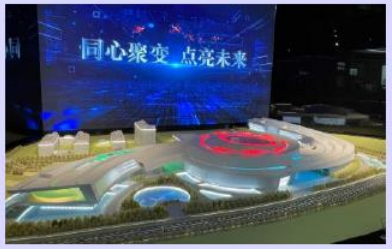
核融合の要素技術を獲得するための大規模試験施設群「CRAFT」を2019年に建設開始し、2025年の完成を見込む。既に14の建屋があり、核融合に必要な機器ごとに大規模試験を実施。
土地・建屋の資金については地元自治体が、試験設備は国が負担。



真空容器のモックアップ（実物大模型）

ITERに先立ってDT運転を行うトカマク型核融合実験炉「BEST」を2023年に建設開始し、2027年に運転開始を見込む。

ITER完成までの間、DT運転を行う装置は中国にしかなく、核融合の実現に必要な人材を世界中から招聘する計画。



核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料3

英国は3番

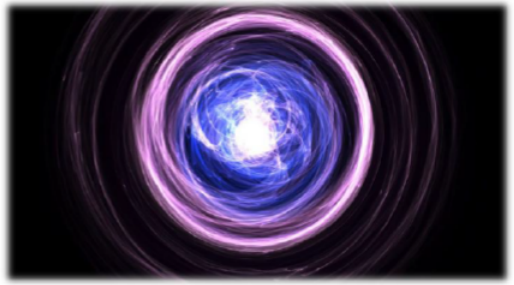
各国におけるフュージョンエネルギーに関する最近の取組

<英国>

- 2023年10月、2021年に策定した戦略を更新。
- 2040年までに、原型炉に相当するSTEP (Spherical Tokamak for Energy Production) を建設するため、実施主体 UKIFS (UK Industrial Fusion Solutions) を設立。建設地を選定するとともに、2024年までの予算として、2.4億ポンドを措置。
- 原子力施設(核分裂)の規制を核融合施設には適用しない旨を記載する法律が2023年10月26日に成立。今後、規制の枠組みの構築に向けて、専門家とともに、フュージョン特有のガイドライン、規制の大綱、損害賠償、輸出管理等を含む、ワークプログラムを制定する予定。
- EURATOM(欧州原子力共同体)からの離脱とともに、2027年まで6.5億ポンドの予算パッケージを公表。
  - up to £200 million for a Fuel Cycle Testing Facility
  - up to £200 million for vital R&D
  - up to £50 million for growing and improving the Culham campus
  - up to £55 million for a Fusion Skills Programme
  - up to £35 million additional funding for the Fusion Industry Programme
  - up to £25 million to enhance international collaborations
  - up to £18 million for a Technology Transfer Hub
  - up to £11 million to further support the STEP programme

Towards Fusion Energy 2023

The next stage of the UK's fusion energy strategy



October 2023

STEP概念図

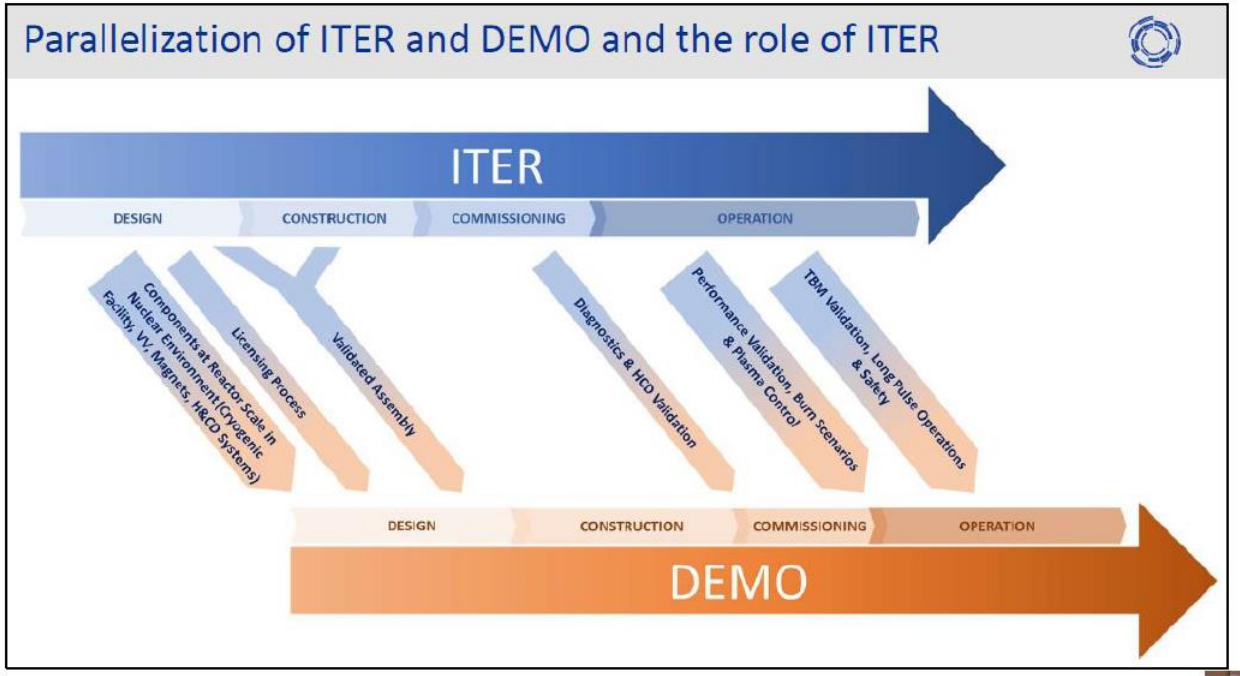
建設予定地
ウエストバートン火力発電所跡地

各国におけるフュージョンエネルギーに関する最近の取組

欧州が、ITER Q=10と原型炉への決定を分離する、と言い始めたことを記載。
日本政府が方針を変える布石と読める。

＜欧州＞

- 核融合発電に向けたロードマップを改訂中(EUROfusion)
- ITER計画とDEMO(原型炉)の意思決定の接続性を減らすため、並行化を指向。



- 2023年12月1日、盛山文部科学大臣とシムソン欧州委員（エネルギー担当）がフュージョンエネルギーに関する共同プレス声明に署名。
JT-60SAの高度化を支援するとともに、将来の人材育成に向けた取組を強化する意思を表明。

核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料1

日本のロードマップも前向きに変えようとしていると感じられる

資料1
核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略

～国家戦略を踏まえた最近の取組～

内閣府

科学技術・イノベーション推進事務局

移行判断条件からQ=10が消えた。

フュージョンエネルギー研究開発の全体像

◆ 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、原型炉への移行を判断。
◆ 科学技術・学術審議会　核融合科学技術委員会等における議論を踏まえ、原型炉に必要な技術開発の進捗を定期的に確認しつつ、研究開発を推進。

SBIRフェーズ3基金（Small Business Innovation Research）
✓ 中小企業イノベーション創出推進基金を造成し、スタートアップなどの有する先端技術の社会実装を促進

科学的実現性	科学的・技術的実現性	技術的実証・経済的実現性	実用段階
• 臨界プラズマ条件の達成	現在取り組んでいるフェーズ • 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	次に取組を開始するフェーズ • 発電実証 • 経済性の向上	21世紀中葉までに実用化の目途
JT-60（JAEA）	JT-60SA（茨城県、QST） ITER（実験炉）（仏、ITER機構）	JA-DEMO（原型炉）	
	学術研究：GEKKO XII号、LFEX 大型レーザー装置（阪大レーザー研） LHD 大型ヘリカル装置（核融合科学研究所）	2030年代に移行判断 **原型炉TFにて議論** **原型炉実現に向けた体制整備** ✓ QSTを中心に企業も参画 ✓ アクションプランの推進	

未来社会像

核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会
✓ ムーンショット型研究開発制度を活用し、未来社会像からのバックキャストによる挑戦的な研究開発を推進

未来社会像からのバックキャストによるアプローチ

平成29年12月18日のC&R項目表

文科省　核融合科学技術委員会　報告書「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2019/02/18/1400137_01.pdf

平成29年12月18日
核融合科学技術委員会

チェック・アンド・レビュー項目(案)

項目	第1回中間C&Rまでの達成目標	第2回中間C&Rまでの達成目標	原型炉段階への移行判断
① ITERによる自己加熱領域での燃焼制御の実証	・ITERの技術目標達成計画の作成。	・ITER支援研究のITER技術目標達成計画への反映。	・ITERによるQ=10程度以上の(数100秒程度以上)維持と燃焼制御の実証。
② 原型炉を見据えた高ベータ定常プラズマ運転技術の確立	・ITER支援研究と定常高ベータ化準備研究の遂行とJT-60SAによる研究の開始。	・JT-60SAによる高ベータ非誘導電流駆動運転の達成。 ・ダイバータを含む統合シミュレーションのJT-60SA等による検証。 ・JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合した	・ITERによる非誘導電流駆動プラズマの実現、及びITER燃焼制御の知見を踏まえた統合シミュレーションにより、非誘導定常運転の見通しを得る。 ・JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合した無衝突領域での安定な高ベータ(β_N = 3.5以上)定常運転領域の
③ ITERによる統合化技術の			化技術の確立。安全技術
④ 原型炉に関わる材料開			ウム確保技術の確立。 化フェライト鋼、並びに、ブ料の初期照射データを取
⑤ 原型炉に関わる炉工学技術開発	・ダイバータ開発指針の作成。 ・超伝導コイル要素技術等、原型炉に向けて早期着手を必要とする炉工学開発計画の作成。 ・コールド試験施設によるブランケット設計に必要なデータの取得。	バータ関連データの取得。 ・超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の中規模またはプラント規模の炉工学開発計画の作成、並びに、これらの開発試験施設の概念設計の完了。 ・発電ブランケットの基盤技術整備、並びにITER-TBM1号機製作と実機での安全性確証試験の完了。	・開発試験施設での成果およびITER,JT-60SA等の実績を踏まえた、超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の原型炉工学設計を裏付ける炉工学技術の確立。 ・ITER によるトリチウム回収及び核融合中性子源によるトリチウム挙動評価技術の検証。
⑥ 原型炉設計	・原型炉の全体目標の策定。 ・原型炉概念設計の基本設計。 ・炉心、炉工学への開発要請の提示。	・炉心、炉工学技術の開発と整合をとり、高い安全性を確保し経済性の見通しにも配慮した原型炉概念設計の完了。 ・工学設計の技術基盤確立に向けた炉心、炉工学開発課題の確定と開発計画の作成。	・社会受容性と実用化段階における経済性の見通しを得て、炉心・炉工学技術の開発と整合をとった原型炉工学設計の完了。 ・安全規制・法令規制の方針策定。
⑦ 社会連携	・アウトリーチヘッドクォータの設置。 ・アウトリーチ活動推進計画の立案	・アウトリーチ活動の推進と社会連携活動の実施。	・原型炉建設・運転に向けた社会連携活動の実施。

原型炉段階への移行判断

・ITERによるQ=10程度以上の(数100秒程度以上)維持と燃焼制御の実証。

1）日本の開発ロードマップ

文科省2018年発表　https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm

これがついに変わるのではないかと大いに期待したい。

核融合戦略有識者会議
令和6年3月29日
資料1

ムーンショットが本道ではないことを明示。これは正論。

ムーンショットは大学等への基礎研究に予算が回わり、将来の人材の育成につながるので賛成だが、ITER・原型炉が本道であることを明示すべきと思ってきた。

ムーンショット型研究開発制度との 協働がある 場合

革新的な社会実装を目指す研究が先回りして成果を創出することで、ITER／BA／原型炉から発電へと続く道をより確実なものにすることが可能。

米英追随に見えていた日本の方針は、本道に戻りつつあるようだ。
これに沿って、1日も早く、ロードマップの前倒しを決めてほしい。

⇒核融合科学技術委員会に案は出されているが決定が保留になっている。
2025年に予定のC&R（チェック アンド レビュー）まで待っているのは遅すぎないか。
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/1419654_00016.htm
https://www.mext.go.jp/content/20230201_mxt-kaisen_000027282_5.pdf

ムーンショット型研究開発への予算がついたのは、人材育成の観点でよかったが、本道のJT-60SA・ITER・原型炉への大型予算も早くつけ、人員も増強し、中国に後れを取らぬよう、本道をさらに推進していただきたい。