核融合炉とエネルギー

（一財）エネルギー総合工学研究所・理事長
寺井　隆幸
t-terai@iae.or.jp
teraitaka@aol.com

2025.2.17

Fusion Science School 京都

寺井隆幸（自己紹介）

- 1954.5　兵庫県神戸市生まれ（兵庫県・私立六甲学院高等学校出身）
- 1978.3　東京大学工学部原子力工学科卒業
- 1980.3　東京大学大学院工学系研究科修士課程（原子力工学専攻）修了
- 1983.3　東京大学大学院工学系研究科博士課程（原子力工学専攻）修了
- 1983.4　日本学術振興会奨励研究員に採用
- 1984.11　東京大学工学部助手（原子力工学研究施設@東海村）に採用
- 1986.11～1987.2　アメリカ・ローレンスリバモア国立研究所に客員研究員として滞在
- 1987.12　工学部助教授（原子力工学科）に昇任
- 1992.5 ～1993.2　ドイツ・カールスルーエ原子力研究所に客員研究員として滞在
- 1994.4　大学院重点化により工学系研究科システム量子工学専攻に所属変更
- 1996.4　工学部総合試験所へ配置換え
- 1999.4　大学院工学系研究科教授（システム量子工学専攻）に昇任
- 2000.4　工学部システム創成学科 （環境・エネルギーシステムコース）に併任
- 2003.7　大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設(東海村)に配置換え
- 2005.4　大学院工学系研究科原子力国際専攻に配置換え
- 2007.11　大学院工学系研究科総合研究機構に配置換え
- 2020.3　東京大学定年退職
- 2020.6　東京大学名誉教授
- 2020.8　一般財団法人 エネルギー総合工学研究所理事長に就任

- Face Book（個人、友達限定）： https://www.facebook.com/takayuki.terai.5
- （ご希望があれば、メッセンジャー等で本講義へ参加した旨を明記いただき、リクエストをお願いします）
- Instagram(個人)：https://www.instagram.com/takayuki.terai.5/
- Twitter（個人）： https://twitter.com/TakayukiTerai
- Face Book（国内・海外/こんなとこ行きました）：https://www.facebook.com/terai.jp/
- Face Book（東大時代の研究室）： https://www.facebook.com/terailab

- 主な専門分野：粒子線照射やプラズマによる材料の物性制御と新機能創出、原子力・核融合炉工学、環境・エネルギーシステムの要素技術（原著論文約470報、総説35報、著書20冊）

- 趣味：旅行（特に海外。今は、中南米・アフリカ・中東・中央アジア・南アジアなどへいってみたい）、読書（地理・歴史・社会・文化・自然科学）、博物館めぐり、適度なスポーツ、写真術（昔はDPEもやりました。今はもっぱらデジタルカメラ）

©2025 IAE

（一般財団法人）エネルギー総合工学研究所

・役員：理事長・副理事長（専務理事）・常務理事・理事8名・監事2名、評議員：12名、職員:約60名
・エネルギー技術の体系的基盤の確立・向上を図り、国民経済の健全な発展に寄与することを目的に、1978年4月1日に「財団法人エネルギー総合工学研究所」として設立。https://www.iae.or.jp/

■ 当研究所の主な調査研究テーマ及び専門性等

■役割　①調査研究、FS（システム設計・評価（経済性及び技術性）、実用化シナリオ策定）、実証試験
②PJのとりまとめ・全体調整、③分野別研究会の主宰（プラットフォームとしてシーズ探索、PJ提案）
■政府機関、独立行政法人、民間企業、海外研究機関等からの受託事業／会費収入による自主研究
■実施にあたり、大学、事業会社、研究機関等とコンソーシアムを構築

地球環境

＜調査研究テーマ＞
・エネルギー需給構成、CO2削減効果などのシステム分析
・エネルギー需要に関する調査研究
・ネガティブエミッションに関する調査研究
・国際規格の策定支援（CCS分野）
・国際エネルギー機関研究開発プライオリティ設定専門家会合（IEA EGRD）への参画

＜専門性・関係海外研究機関＞
・エネ総研モデル（GRAPE、TIMES-Japan）による地球環境およびエネルギーシステムの長期・統合評価分析
・IEA, 米国DOE傘下研究機関, スタンフォード大学

新エネルギー・電力システム

＜調査研究テーマ＞
・再エネ大量導入に対する課題解決策の検討/調査
・電力システム改革、デジタル化に関する検討/調査
・地域エネルギー供給のビジネスモデル策定
・蓄エネルギー技術の開発/実証/調査（ 蓄熱、CAES ）
・高性能熱機関・空調システムの開発支援
・APNet（次世代電力ネットワーク）研究会（東大・横山名誉教授）
・太陽熱・蓄熱技術研究会（新潟大・児玉教授）

＜専門性・関係海外研究機関＞
・熱システム解析・評価
・電力システムの計画・運用・保全技術、海外の電力システムの調査分析
・DLR（ドイツ航空宇宙センター）

原子力

＜調査研究テーマ＞
・1F事故解析への貢献（OECD/NEA、日米協力）
・次世代炉・革新炉（含SMR）に関する調査研究・開発支援
・IAEA安全基準対応支援、諸外国安全制度調査
・廃止措置に向けた基盤整備（学会規格・標準の提案）
・人材育成支援
・廃止措置調査検討委員会（東大・岡本教授）
・廃止措置へのDX適用に係る勉強会

＜専門性・関係海外研究機関＞
・熱流動解析（SAMPSONコード、数値シミュレーション）
・安全規制制度（IAEA等）　・放射能インベントリ評価
・IAEA、NEA、MIT、米国DOE傘下研究機関

＜S＋3Eを支えるエネルギー技術＞

・Safety：安全性
・Energy Security：エネルギー安全保障
・Economic Efficiency：経済性
・Environment：環境適合性

水素

＜調査研究テーマ＞
・エネルギーキャリアとしての水素
（水素需要量の分析、各種エネキャリの経済性・環境性分析）
・蓄エネルギー手段としての水素
（再エネ有効利用のための水素利活用、PtG）
・水素を支える個別技術分野
（水電解技術、水素発電・燃焼タービン、水素液化技術）
・ゼロエミ水素ビジョン研究会（RITE 山地理事長）

＜専門性・関係海外研究機関＞
・シナリオ分析と策定・製造から利用までのシステムコスト評価
・SINTEF（ノルウェー産業科学技術研究所）
・IMDEA（マドリッド高等研究所）

炭素循環

＜調査研究テーマ＞
・CO2分離・回収・貯蔵、CO2輸送、CO2有効利用の各技術に関する調査・分析（含、DAC、CNPの調査・検討）
・海外再エネ由来のCO2フリー燃料を核としたカーボンリサイクル等を含むエネルギーシステムの検討/調査/評価
・低炭素社会に資する革新的技術のポテンシャル調査/分析
・次世代火力発電技術ロードマップや省エネ戦略等の施策支援
・廃棄物活用、石油化学コンビナート脱炭素化検討
・ACC（人為的カーボンサイクル）技術研究会（早大・中垣教授）

＜専門性・関係海外研究機関＞
・数値解析　・プロセス設計　・C1化学
・CSIRO（オーストラリア連邦科学産業研究機構）

（注）調査研究テーマのうち、個別名称はこれまでの受託・自主事業実績

（2022.7 策定）

Copyright; 2022 IAE. All rights reserved.

最近、エネルギー関係の本を出版しています

エネルギー総合工学研究所編著「図解でわかるカーボンリサイクル」（技術評論社、2020)
エネルギー総合工学研究所編著「図解でわかるカーボンニュートラル」（技術評論社、2021)
エネルギー総合工学研究所編著「見てわかる！エネルギー革命」(誠文堂新光社、2022)
CN2燃料の普及を考える会編著「図解でわかるカーボンニュートラル燃料」(技術評論社、2022) 所員が一部分担執筆
エネルギー総合工学研究所編著「図解でわかる再生可能エネルギー×電力システム」(技術評論社、2023)
エネルギー総合工学研究所編著「カーボンニュートラル2050ビジョン」（エネルギーフォーラム社、2024）

毎年、シンポジウムを開催し、毎月、月例研究会を開催しています。いずれも現在は参加費無料。ここ2年間はオンライン形式。
詳細は研究所のホームページをご参照ください。 https://www.iae.or.jp/
多くの特典（季刊誌「エネルギー総合工学」の無料配布・シンポジウム・月例研究会・賛助会員会議へのご招待等）がある賛助会員を募集中（現在 106 法人）。

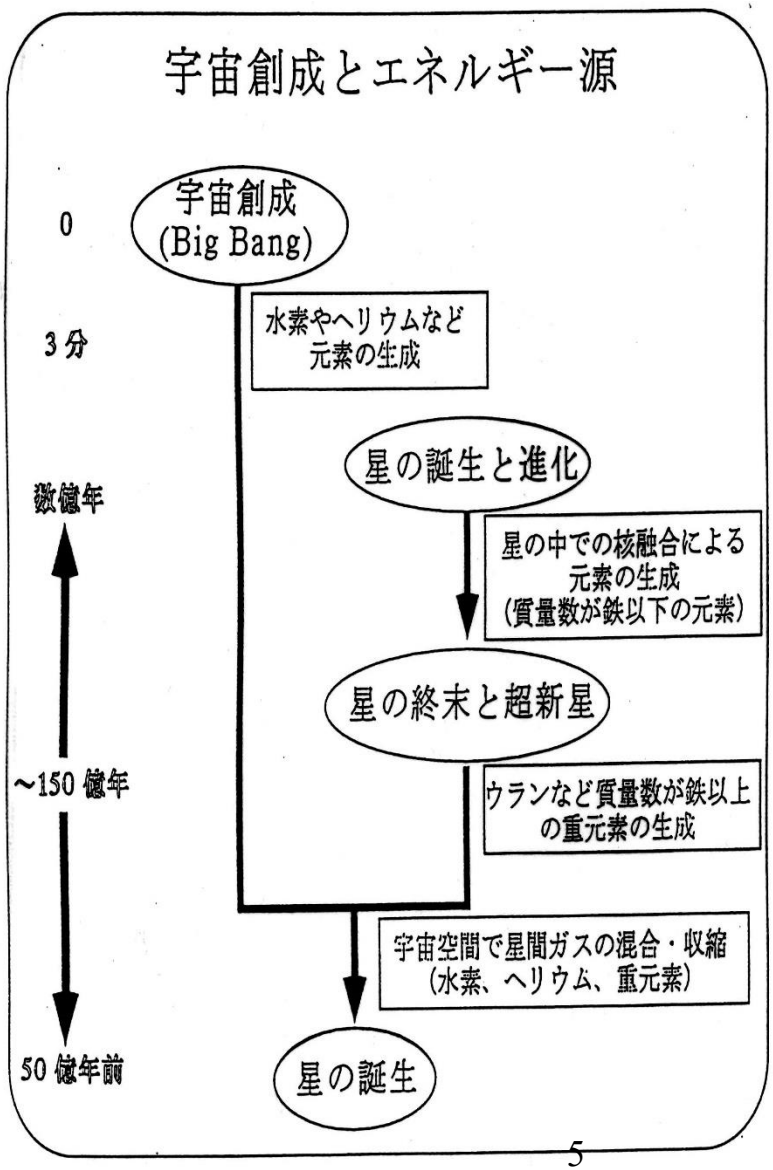
©2025 IAE

講演アウトライン

- 核融合って何
- 核融合炉システムとその開発シナリオ
- カーボンニュートラル社会における核融合の役割

©2025 IAE

核融合は宇宙のエネルギー源



©2025 IAE

太陽における核融合反応

太陽の単位体積あたりの発熱は人体の1/100。

しかし、巨大だから熱い。

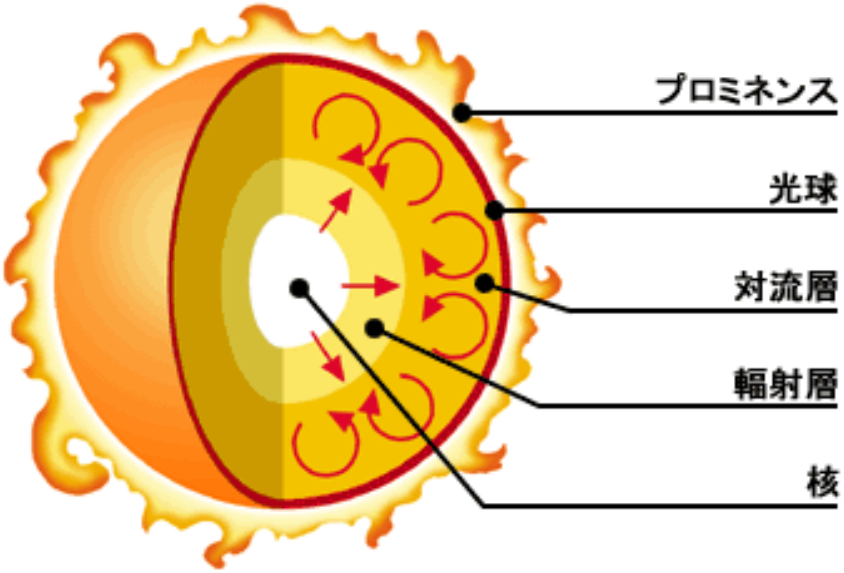
複数の過程のサイクルを介するが，まとめると，

$$4\,{}_1H^1 + 2\,e^- \rightarrow {}_2He^4 + 6\,\nu + 2\,\gamma$$

反応の時定数：140億年

水素(H)4つと2つの電子から<u>ゆっくりと</u>ヘリウム1つができる。(ニュートリノとγ線も放出する)。

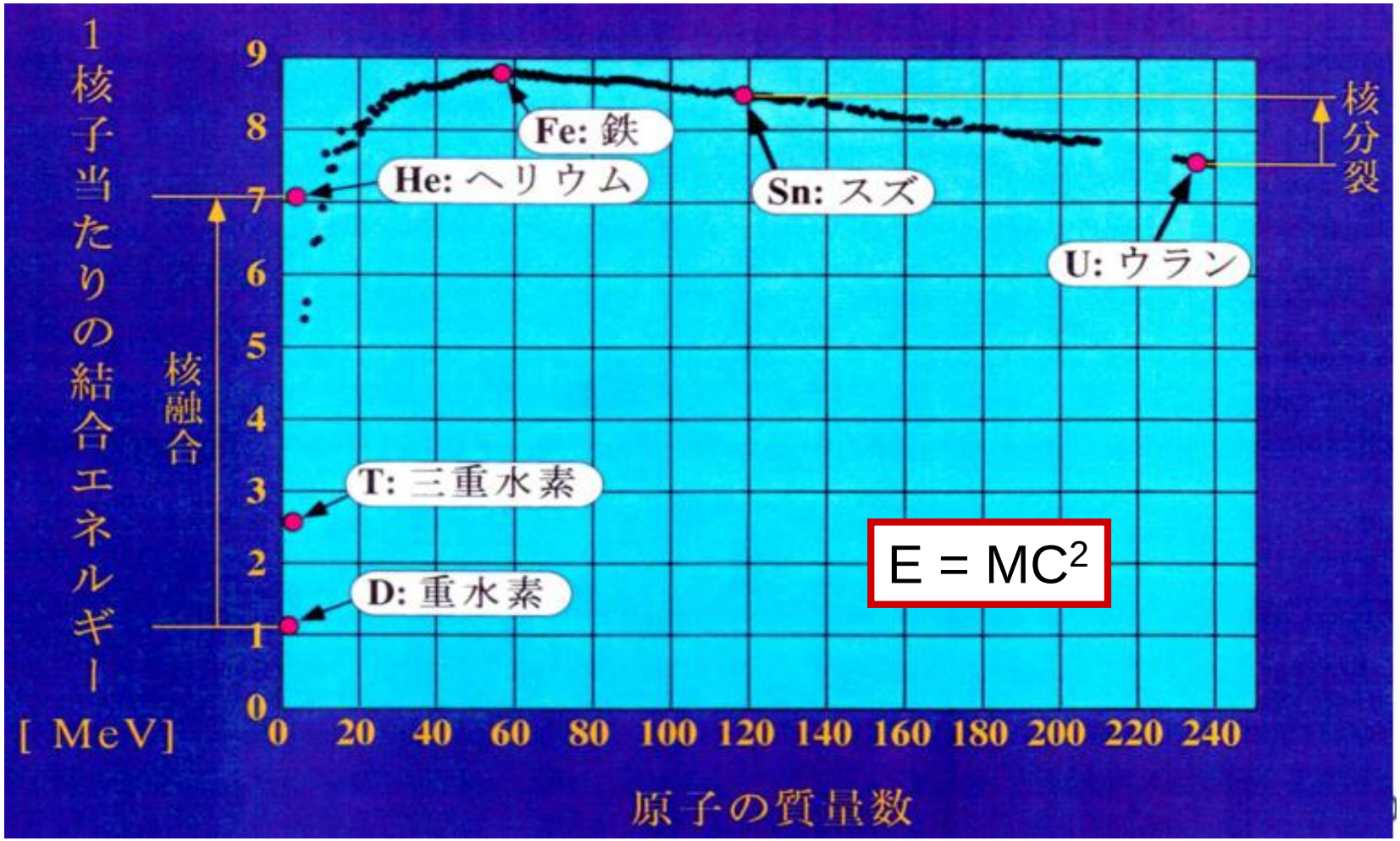
この反応は遅すぎて使えない。



©2025 IAE

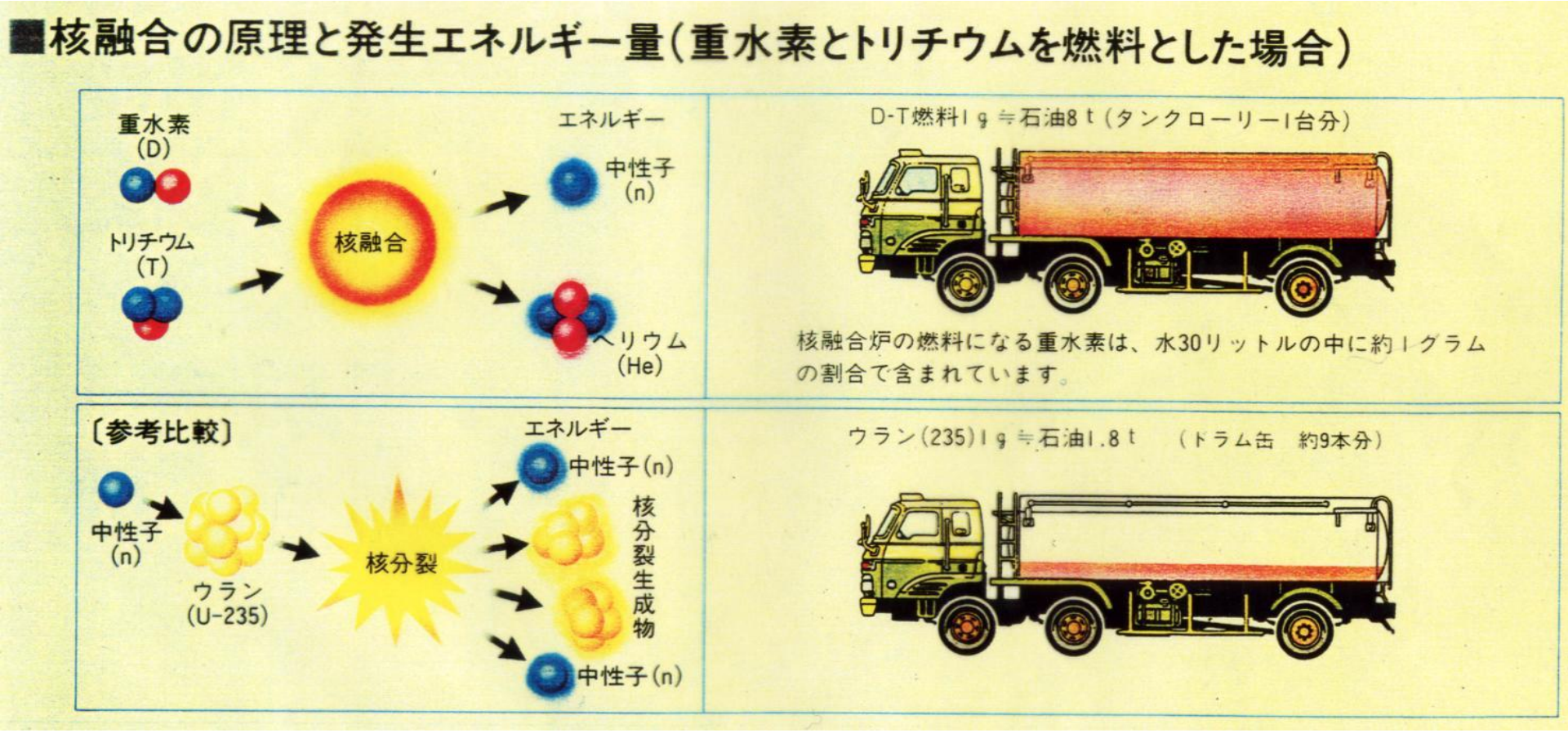
原子核の持つエネルギー

鉄よりも原子質量数の大きい原子核は核分裂によりエネルギーを放出し、
鉄よりも原子質量数が小さい原子核は核融合によりエネルギーを放出する。



©2025 IAE

原子核反応のエネルギー密度は桁違いに大きい



©2025 IAE

核分裂炉の特長と課題

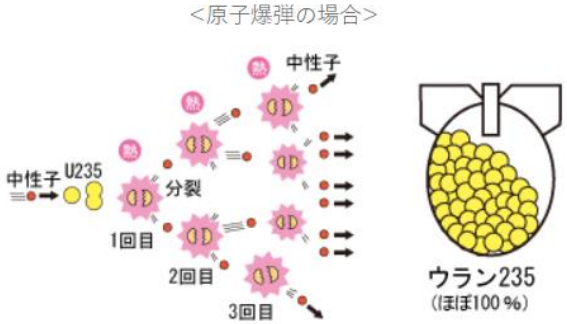
- 燃料のエネルギー密度が高く（典型的には100万kWの電力を数年間生産可能なエネルギーを内包）、かつ連鎖反応で指数関数的に出力が増加しうるため、核反応の制御に失敗すると膨大なエネルギーを発生しうる。

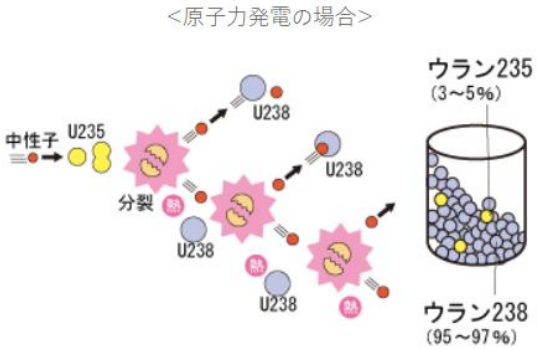
→ 物理的に出力急上昇が起きない領域で運転する
有事にあたっては、まず「止める」ことが重要

- 連鎖的な核反応を止めることができても、燃料中に生成している核反応生成物（FP；Fission Product）が熱を発生し続ける
- 熱量は時間ともに減少するが停止直後は定格出力の数%に達する

→ 冷却し続けなければ、容易に冷却水が蒸発し
燃料溶融を起こしうる

事故対応も含め、安全確保に十分に配慮した設計が行われている
高レベル廃棄物の処理・処分も課題





©2025 IAE

核融合エネルギーの特徴

① 豊富な資源

・燃料となる重水素、リチウム（三重水素のもと）は海中に豊富

・少量の燃料から膨大なエネルギー

② 固有の安全性

・核的暴走がなく、核分裂と比べ安全対策が比較的容易

③ 高い環境保全性

・地球温暖化の原因となる二酸化炭素の発生が少ない。

・低レベル放射性廃棄物は発生するが、従来技術で処理処分が可能。

核融合研究開発の意義

・核融合エネルギーは、上記の特徴を持ち、将来のエネルギー源の一つの選択肢。

・資源小国の我が国としては、長期的な観点から核融合の研究開発を着実に推進していくことが重要。

・諸外国においても、将来のエネルギー源として重視し、研究開発を推進するとともに、ITER計画に参加。

©2025 IAE

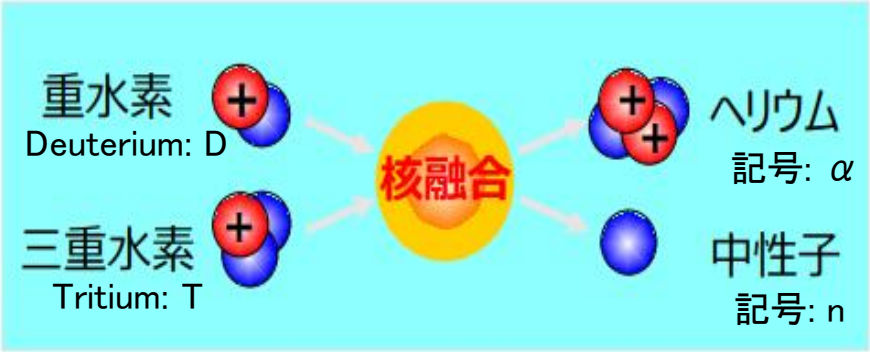
核融合と核分裂の特徴のまとめ

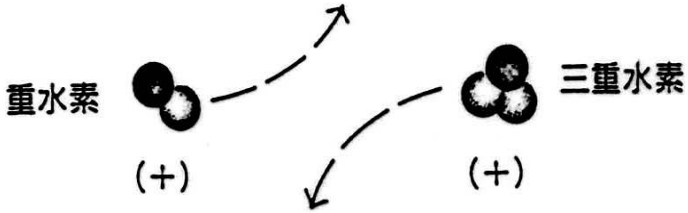
	核融合	核分裂
反応しやすさ	1億℃程度以上にする必要があるため、その実現は容易ではない。	中性子の連鎖反応により容易に発生可能
制御性	運転条件を逸脱すれば反応は**容易に停止**する。	1年分以上の燃料を炉内に内包しており、**潜在的に大事故**につながるリスクがある。
燃料のエネルギー密度	原子力と比較しても2桁程度高い	化石燃料と比較して桁違いに高い
反応生成物	主に**ヘリウム**	核分裂生成物は崩壊熱を放出するとともに**高レベル廃棄物**となる
燃料の確保	海水中に豊富に存在	ウランの**可採年数**は100年以下であり、資源の地域偏在性もある。

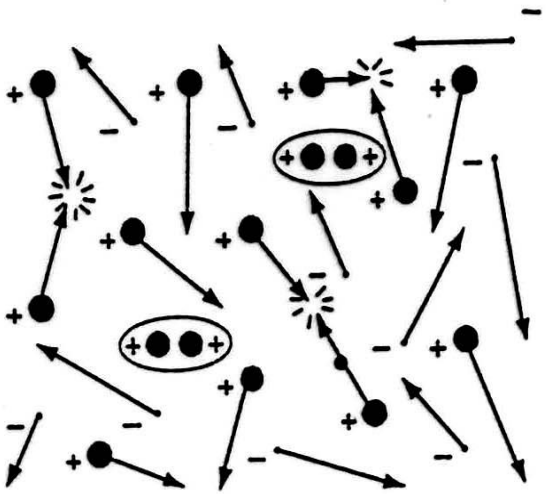
©2025 IAE

核融合反応を起こすためには

- 核融合は原子核（正イオン）同士が衝突することで発生する
- 最も起こりやすいのは下記の重水素（Deuterium: 記号D）と三重水素（Tritium: 記号T）の反応であるが、他の反応も存在する （次ページ参照）
- 基本は正イオン同士が衝突するため、クーロン力（正の電荷が反発しあう力）を乗り越えて衝突させる必要がある。
- 従って、燃料となるイオンを十分に加速して衝突させる必要がある。







©2025 IAE

主要な核融合反応

1. 重水素(D)−三重水素(T)反応

D ＋ T → α ＋ n (17.59MeV)

最も反応が起こりやすい。
多くの研究はこの反応を想定。
核融合エネルギーの8割が中性子

2. 重水素(D)−重水素(D)反応

D + D → T ＋ p (4.03MeV)
または
D + D → ^{3}He ＋ n (3.27MeV)

高速中性子の発生量は少なくなるが、反応に必要な温度は高くなる。

3. 重水素(D)−ヘリウム−3(^{3}He)反応

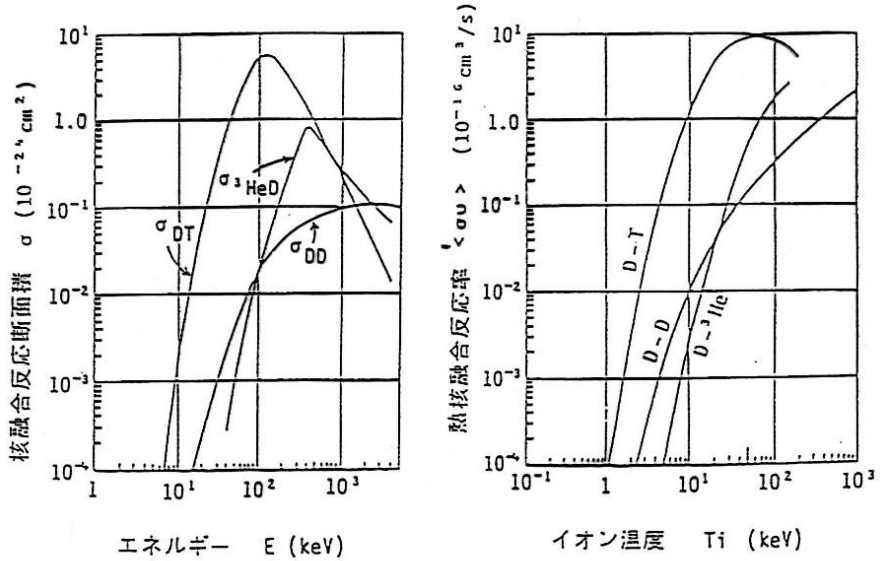
D + ^{3}He → α ＋ p (18.35MeV)

高速中性子の発生量はさらに少なくなるが、なくなるわけではない。更なる高温が必要なうえ、^{3}Heの確保も課題

3. プロトン(P)−ホウ素−11(^{11}B)反応

p ＋ ^{11}B → 3α (8.68MeV)

この反応は中性子フリー。ただしより高い温度が必要であり、その達成は極めて困難



10keVは温度に換算すると１億℃

©2025 IAE

核融合反応自体を起こすことは難しくないが、炉となると・・・

- 高エネルギーのビーム同士を衝突させたり、あるいは加速器で高エネルギー粒子をターゲットに当てることでも核融合反応は起こる。

→放電管や加速器を用いた中性子源

  - これまでの実験で、反応の起こりやすさ（＝反応断面積）のエネルギー依存性も概ね明らかになっている。

- しかし、この方法では、発生するエネルギーが投入するエネルギーを下回るため、炉にはならない。

- 核融合炉にするためには反応を連続的に高密度で起こす必要がある。

燃料粒子同士を衝突させるために必要なスピードは毎秒1千 km 以上で、このスピードは重水素（D）と三重水素（T）を1億度以上の温度に加熱することにより得られる(ガス分子は解離・電離してプラズマになる）。そのため、核融合の燃料である原子核を「たくさん（高い密度で）」、「長い時間」一定の領域に閉じ込めておくことが必要である。

©2025 IAE

核融合の条件を実現するためには

- 太陽は巨大な核融合炉

→巨大な質量による重力によりプラズマを閉じ込めている

（閉じ込め性能はそれほど良くないので、漏れ出している→太陽風）

→閉じ込め時間はほとんど無限大

- 核融合を地上で実現するためには2つの方法がある

- 磁場で籠を形成

＝磁場閉じ込め方式

主に外部磁場で閉じ込め
トカマク型
ヘリカル型
その他ステラレーター

主にプラズマ電流が作る磁場にて閉じ込め
FRC
Zピンチ
スフェロマック　など

- 燃料球を瞬時に圧縮

＝慣性閉じ込め方式

レーザー、衝撃波　など
水爆もこの方式

©2025 IAE

磁場核融合とレーザー核融合の比較

第１３回
原子力委員会
資料第１－４号

磁場核融合

固体密度の10 億分の１
定常炉
燃料直径：10 m

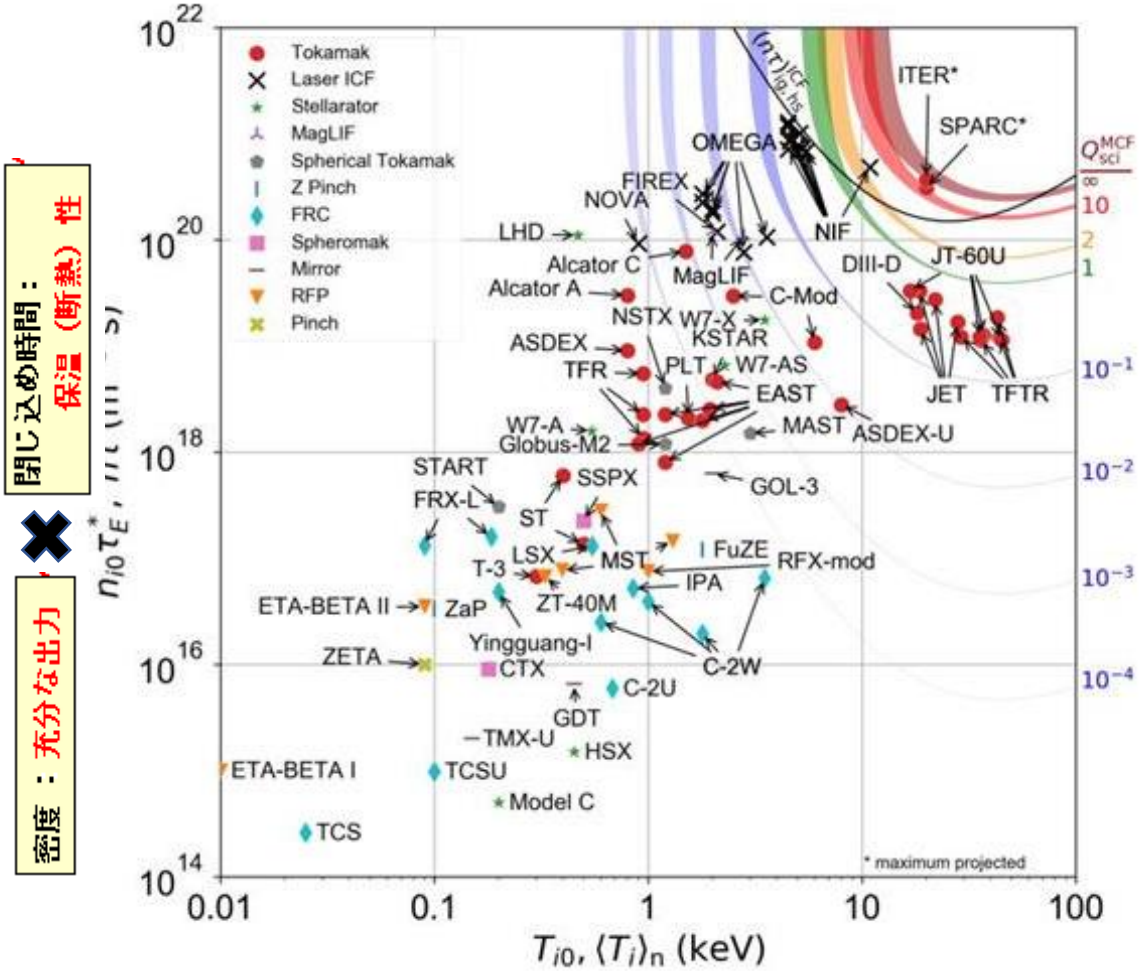
日本原子力研究開発機構、
核融合科学研究所、
ITER国際核融合エネルギー機構他

レーザー核融合

固体密度の1000倍
パルス炉（１秒に数回繰り返す）
燃料直径：５ mm
意義：異なる原理→炉の可能性を拡げる
　　コンパクト
　　負荷変動に対応
大阪大学、米ローレンス・リバモア国立研究所、仏国原子力庁他

核融合三重積の変遷

- 大型トカマクとレーザーがQ>1を達成
- ステラレータは中型トカマクと同程度
- それ以外の形式はそれよりも桁下。



閉じ込め時間：保温（断熱）性

✖

密度：充分な出力

温度：反応が良く起こる

ガスバーナーの点火

数億度の超高温が必要

核融合炉の自己点火

出典　Sam Wurzel and Scott Hsu, Physics of Plasmas 29, 062103 (2022)

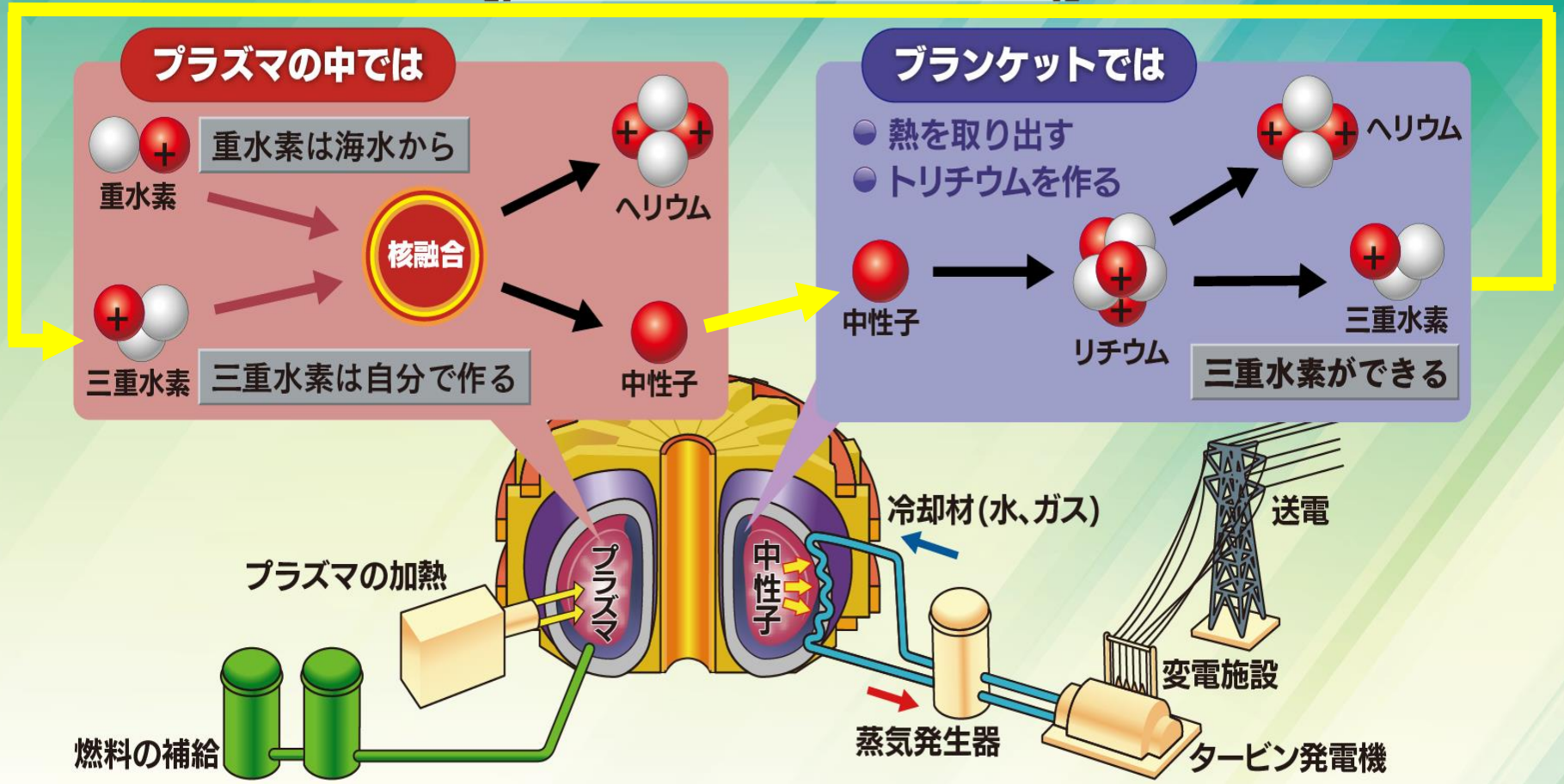
©2023 IAE

講演アウトライン

- 核融合って何
- 核融合炉システムとその開発シナリオ
- カーボンニュートラル社会における核融合の役割

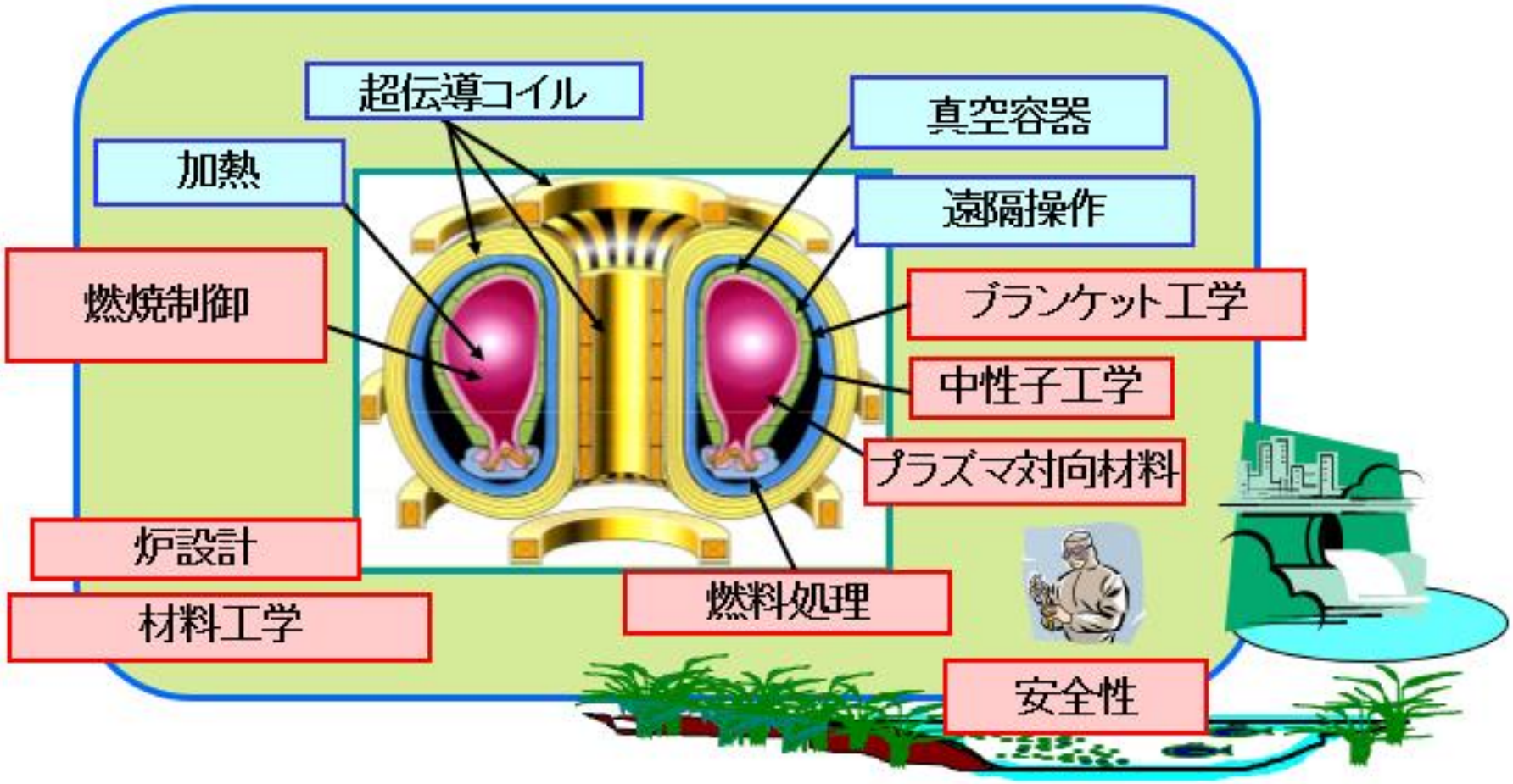
©2025 IAE

核融合炉のしくみ



©2025 IAE

磁場閉じ込め核融合のための工学技術



©2025 IAE

フュージョンエネルギー（核融合）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

・臨界プラズマ条件の達成

JT-60
（JAEA）

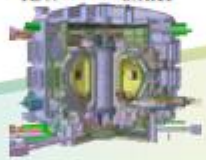
科学的・技術的実現性

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

JT-60SA
（茨城県、QST）

ITER（実験炉）
（仏、ITER機構）



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）

技術的実証・経済的実現性

次に取組を開始するフェーズ

・発電実証
・経済性の向上

JA-DEMO（原型炉）

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

実用段階

21世紀中葉までに実用化の目途

未来社会像

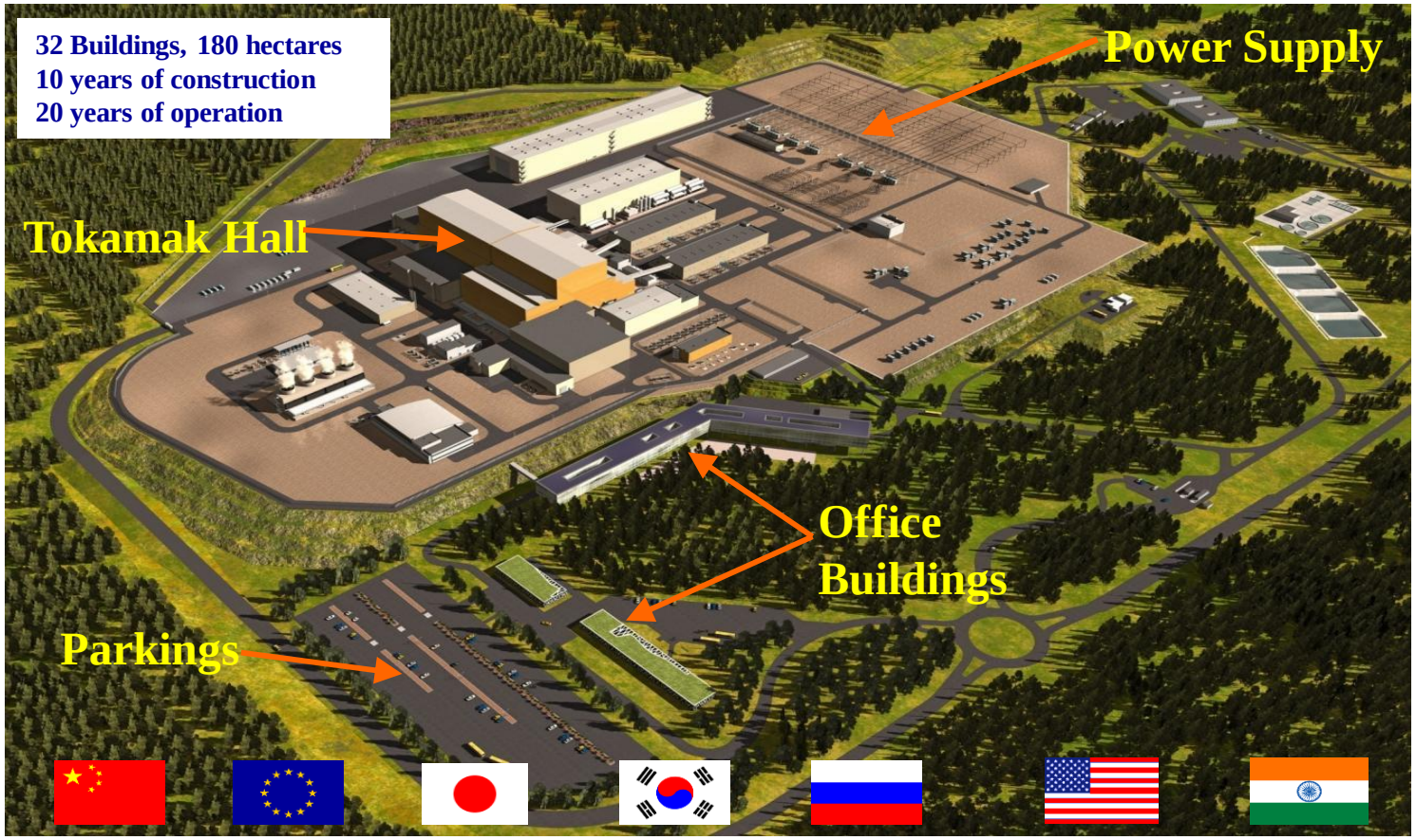
核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会
✓ムーンショット型研究開発制度を活用し、未来社会像からのバックキャストによる挑戦的な研究開発を推進

未来社会像からのバックキャストによるアプローチ

©2025 IAE

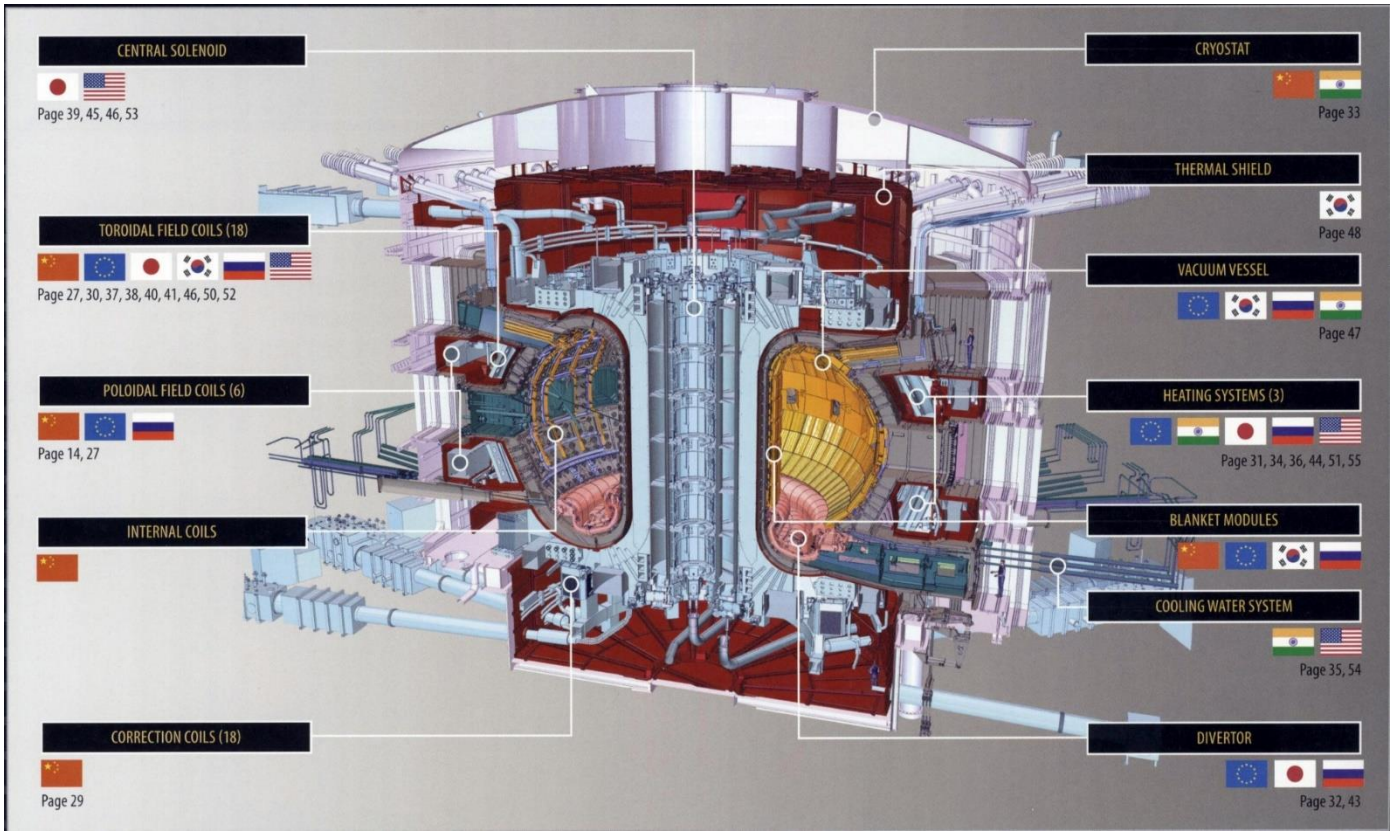
ITERサイトの完成図

- 主要機器の開発研究はほぼ終了し、仕様を満たす完成品の大部分が既に納入されている状況である。
- 本体の組み立てもかなり進んでおり、2025年の運転開始を目指していたが、比較的大きなトラブルにより、2034年に延期。



©2025 IAE

ITERの構造

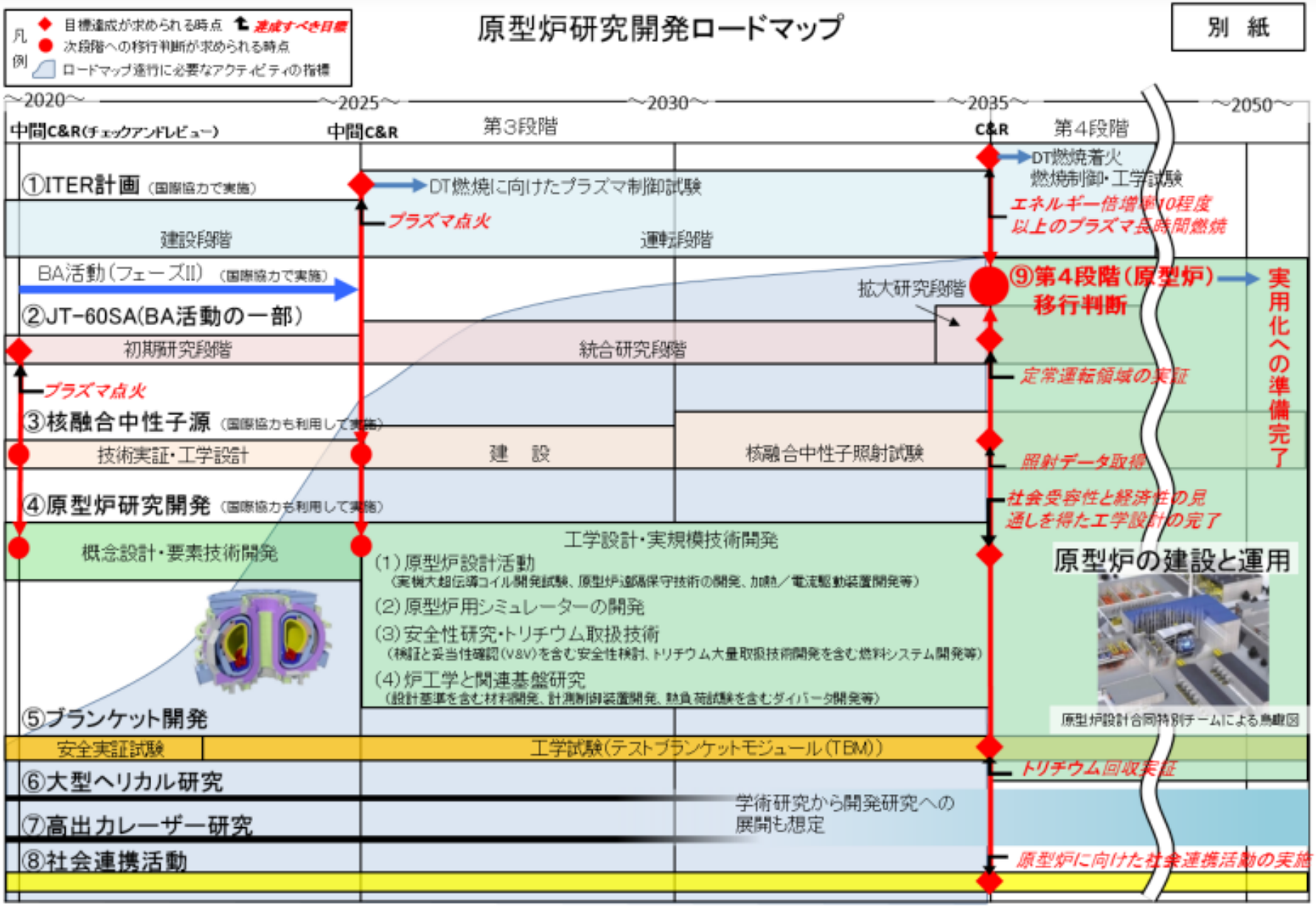


- **ITERの目標**
  - **内部核融合による加熱を中心として核融合条件が維持されるような重水素・トリチウムプラズマの実現**
  - **長パルス放電におけるプラズマ中での500MWの核融合出力の発生**
  - **核融合発電所の統合的な運転技術の実証への寄与**
  - **トリチウムの増殖**
  - **核融合装置の安全特性の実証**

この実験がうまくいけば、世界で初めて核融合エネルギー出力が投入エネルギーを大きく上回る状態（Q～10）が実現することになる。

©2025 IAE

原型炉開発のロードマップ



核融合発電（原型炉）に向けた我が国の研究開発

- 我が国は核融合発電に向け、**世界７極で実施しているＩＴＥＲ計画、日欧協力の下実施している幅広いアプローチ（ＢＡ）活動、核融合科学研究所や大学における学術研究に加え、原型炉研究開発共同研究を実施**してきた。
- 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の結果、**ＣＲ１までの目標は達成されている**と判断されたところだが、国際動向も踏まえ、核融合研究開発に向けた動きを加速していく必要がある。
  → **核融合科学技術委員会の下で、核融合発電の実現時期の前倒しが可能かについても検討を開始**（年内にTFの議論をとりまとめ予定）

ITER計画

ITER補助金・施設整備費補助金

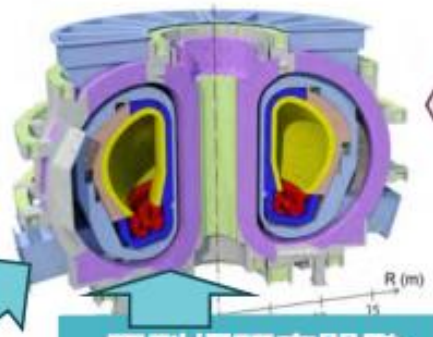
日欧米露中韓印の国際協定に基づき、核融合実験炉ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を確立

実験炉ITER（於：フランス）

2025年の運転開始（ファーストプラズマ）に向け、本体の組立が本格化する中、2035年の核融合運転に必要となる機器の開発について本格的に取り組む必要。

【核融合発電に必要な機器】

核融合原型炉



安全性・技術標準

核融合発電・原型炉に向けた諸外国の政策動向・技術動向、原型炉建設に向けた課題（技術、制度、規制など）を調査

BA活動

BA補助金・施設整備費補助金

日欧協力の下、ITER計画を補完・支援するとともに、核融合原型炉に必要な技術基盤を確立するための先進的研究開発を実施

IFMIF/EVEDA事業

核融合原型炉に必要な高強度材料の開発を行うための施設の設計・建設に向け、原型加速器を製作

IFMIF原型加速器

IFERC事業

核融合原型炉の概念設計や技術検討（日欧共通箇所）や、プラズマシミュレーション研究、ITER等の遠隔実験解析に向けたネットワーク整備を実施

スパコン「六ちゃん-Ⅱ」

STP事業

先進超伝導トカマク装置JT-60SA（ITER完成まで世界最大）の建設・運転を通じたデータ蓄積・人材育成を実施

JT-60SA

原型炉研究開発

BA補助金の一部

原型炉設計合同特別チーム(QST、NIFS、大学、産業界が参画）による原型炉設計活動や原型炉に向けて必要となる研究開発課題を設定、QST/NIFSが共同研究の形で実施

QST

アクションプランの遂行に向けて直接的に必要となる研究開発を大学や産業界と連携して実施

例）超伝導コイル、ダイバータ、加熱・電流駆動装置など

NIFS

原型炉に向けて飛躍的な技術進展（学術的な研究）が必要な課題を大学との共同で実施

例）ブランケット、ダイバータなど

QST-NIFS共同研究

それぞれの組織の特性・ネットワークを活用し原型炉に向けた共同研究を実施

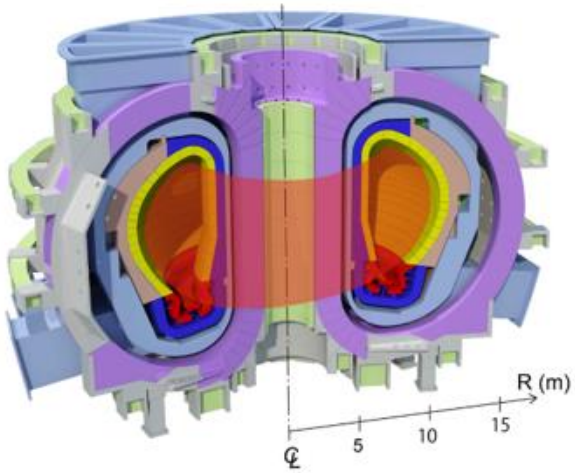
例）原型炉用ダイバータ開発、原型炉用ＮＢＩ負イオン源開発、中性子計測イオン源開発等

©2025 IAE

原型炉の構想図

JA DEMO

①数十万kWを超える定常かつ安定した電気出力
②実用に供し得る稼働率
③燃料の自己充足性を満足する総合的な三重水素増殖



R_p	8.5m	n_e/n_{GW}	1.2
a_p	2.42m	HH_{98y2}	1.3
B_{T0}	6T	冷却方式	PWR条件
I_p	12.3MA	稼働率	~70%
P_{aux}	<100MW	運転方式	定常運転
β_N	3.4	TBR	1.05

- 主冷却系の熱収支と設備所要電力を評価

核融合出力	150 万kW
有効熱出力	187 万kW
発電端出力	約64 万kW
循環・所内電力	約39 万kW
正味（送電端）出力	約25 万kW

©2025 IAE

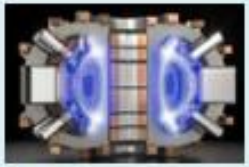
核融合炉の実現を目指す多様な炉型

世界各国で、多様な炉型による取組が進展

磁場閉じ込め型

トカマク型

(日) JA-DEMO



(米) Commonwealth Fusion Systems
2,800億円以上を調達
ビルゲイツ、Googleなど

ヘリカル型

(日) 核融合科学研究所 (NIFS)

(日) Helical Fusion
9億円以上を調達

球状トカマク型

(英) Tokamak Energy
350億円以上を調達

(中) ENN
260億円以上を調達

逆磁場配位型

(米) Helion Energy
800億円以上を調達
サムアルトマンなど

(米) TAE Technologies
1,680億円以上を調達

ミラー型

(米) Lockheed Martin
飛行機や船等の動力源として開発中

慣性閉じ込め型

レーザー型

中心点火方式

(米) ローレンス・リバモア国立研究所

高速点火方式

(日) 阪大レーザー研
(日) EX-Fusion
19億円以上を調達

BLUE LASER FUSION

(米) Blue laser fusion
2,500万ドルを調達

磁化標的核融合

(加) General Fusion
470億円以上を調達
ジェフ・ベゾス

(英) First Light Fusion
130億円以上を調達

Zピンチ

(米) Zap energy
260億円以上を調達

その他

ミュオン触媒

(日) 中部大学

ミュオンの特徴
- 強い結合力→核融合
- 高い透過力→構造物イメージング等

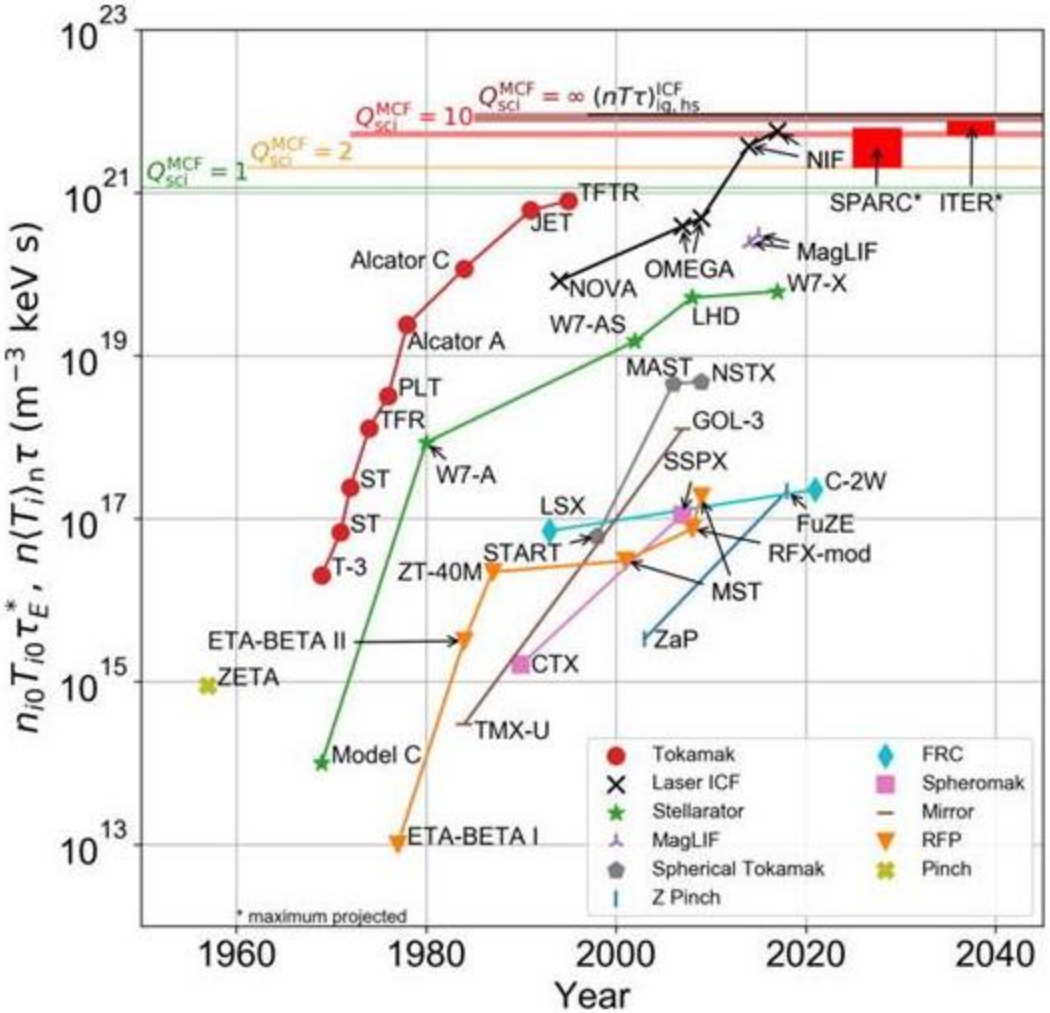
凝縮系

(日) クリーンプラネット
20億円以上を調達

©2025 IAE

スタートアップ企業の現状

- 三重積においては現状ではトカマクより3～4桁遅れている。2030年代に発電実証までたどり着くという可能性は、そう高いものではない。

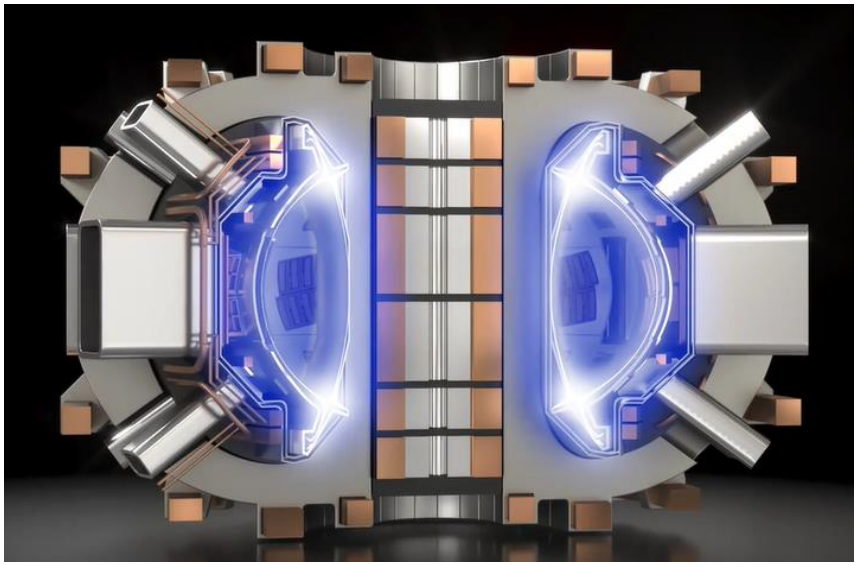


出典　Sam Wurzel and Scott Hsu, Physics of Plasmas 29, 062103 (2022)

©2025 IAE

スタートアップ企業に期待される役割

- 研究開発の自由度とスピード
  - 国家プロジェクトは基本的に保守的な設計にならざるを得ない。
  - ITERのように国際協力で実施する場合、一般にはその意思決定にも時間を要する
  - 民間は国家プロジェクトと比較して、よりとがった概念をよりスピーディーに実施できる可能性がある。
- 技術選択の多様化
  - 近い将来に発電実証炉を見据えることが可能なレベルに到達しているのはトカマクのみといえる。一方、装置が大型化し、経済性には課題がある。
  - 今後よりコンパクトで魅力的な概念が出てくるのであれば基本的には歓迎される。



	大半径m	小半径m	トロイダル磁場T	プラズマ電流MA	Q
ITER	6.2	2.0	5.3	15	10
SPARK (CFS)	**1.85**	**0.57**	**12.2**	8.7	11

©2025 IAE

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略概要

- ✓ **フュージョンエネルギーを新たな産業として捉え**、構築されつつある**世界のサプライチェーン競争に我が国も時機を逸せずに参入**。
- ✓ ITER計画/BA活動、原型炉開発と続くアプローチに加え、産業化等の多面的なアプローチによりフュージョンエネルギーの実用化を加速。
- ✓ **産業協議会の設立、スタートアップ等の研究開発、安全規制に関する議論、新興技術の支援強化、教育プログラム等を展開**。

エネルギー・環境問題の解決策としてのフュージョンエネルギー

- 2050年カーボンニュートラルの実現
- ロシアのウクライナ侵略により国際的なエネルギー情勢が大きく変化
- エネルギー安全保障の確保

⇒

- フュージョンエネルギーの特徴（①カーボンニュートラル、②豊富な燃料、③固有の安全性、④環境保全性）
- エネルギーの覇権が資源から技術を保有する者へとパラダイムシフト

＋

新たな産業としてのフュージョンエネルギー

- 諸外国におけるフュージョンエネルギー開発への民間投資の増加
- 米国や英国政府はフュージョンエネルギーの産業化を目標とした国家戦略を策定
（＝自国への技術の囲い込みを開始）
- 技術的優位性と信頼性を有する我が国が、技術で勝って事業で負けるリスク
- 他国にとっては有力なパートナーであり、海外市場を獲得するチャンス

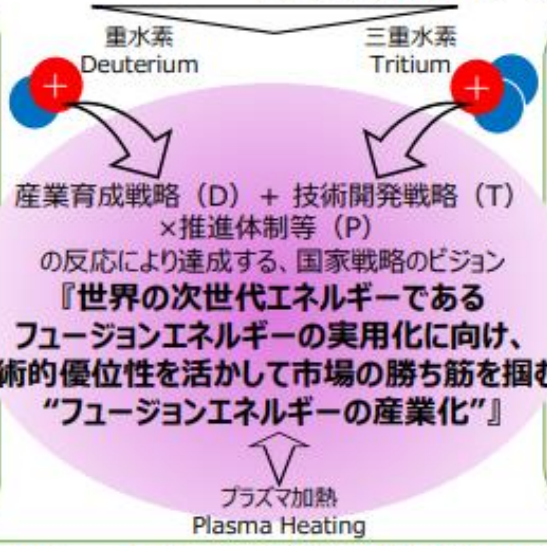
出典：https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/fes-presentations/2022/Wurzel---PPP-Lightning-round-talk.pdf

フュージョンインダストリーの育成戦略 Developing the Fusion industry

【見える】
- 研究開発の加速による原型炉の早期実現
- 技術及び産業マップ作成によるターゲット明確化

【繋がる】
- R5年度の設立を目指す核融合産業協議会でのマッチング

【育てる】
- 民間企業が保有する技術シーズと産業ニーズのギャップを埋める支援をR5年度から強化
- 安全規制・標準化に係る同志国間での議論への参画
- 固有の安全性等を踏まえた安全確保の基本的な考え方の策定



フュージョンテクノロジーの開発戦略 Technology

- ゲームチェンジャーとなりうる小型化・高度化等の独創的な新興技術の支援策の強化
- ITER計画/BA活動を通じてコア技術の獲得
- 将来の原型炉開発を見据えた研究開発の加速
- フュージョンエネルギーに関する学術研究の推進
- 新技術を取り組むことを念頭においた原型炉開発のアクションプランの推進

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等　Promotion

- 内閣府が政府の司令塔となり、関係省庁と一丸となって推進
- 原型炉開発に向けて、QSTを中心にアカデミアや民間企業を結集して技術開発を実施する体制（フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点の設立）
- 将来のキャリアパスを明確化し、フュージョンエネルギーに携わる人材を産学官で計画的な育成
- 国内大学等における人材育成を強化するとともに、他分野や他国から優秀な人材の獲得（フュージョンエネルギー教育プログラムの提供）
- 国民の理解を深めるためのアウトリーチ活動の実施

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略を踏まえた取組

第71回 総合科学技術・イノベーション会議 資料一部改訂（2024年２月20日）

2023年４月に初の国家戦略として、「**フュージョンエネルギー・イノベーション戦略**」を策定。

- ✓ フュージョンエネルギーを新たな産業として捉え、構築されつつある世界のサプライチェーン競争に我が国も時機を逸せずに参入。
- ✓ ITER計画/BA活動、原型炉開発と続くアプローチに加え、産業化等の多面的なアプローチにより、実用化を加速。

フュージョンインダストリーの育成戦略 Developing the Fusion industry

- **フュージョンエネルギー産業協議会(通称: J-Fusion)**の設立
- SBIRフェーズ3基金を活用し、**スタートアップ**の有する先端技術の社会実装を促進

フュージョンテクノロジーの開発戦略 Technology

- 小型化・高度化等の独創的な新興技術の支援策の強化(**ムーンショット目標**の決定)
- 世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置 **JT-60SA**の初プラズマ生成

ITER機構長の総理表敬(2023年11月30日)

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等 Promotion

- QSTを中心にアカデミアや民間企業が参加する**実施体制の構築**
- 大学間連携による**教育プログラムの提供**、ITER / JT-60SA等を活用した人材育成

JT-60SA 運転開始記念式典(2023年12月1日)

今後の方針

ITER、JT-60SA等で培った技術や人材を最大限活用して、**国際連携も活用し、原型炉に必要な基盤整備を加速**。**産業協議会とも連携**して、**安全確保の基本的な考え方**を策定するなど、**フュージョンエネルギーの早期実現**、**関連産業の発展**に向けた取組を加速。

14

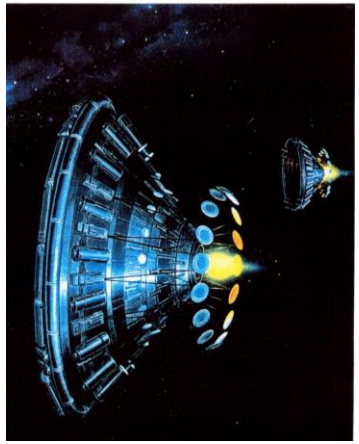
核融合の応用

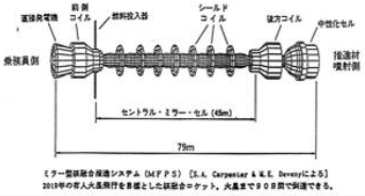
核融合の応用範囲は安定なベースロード電源だけではない。ムーンショット型開発研究制度では様々な応用範囲が期待されている。

- 水素製造
- 海水淡水化
- 海洋推進機
- 宇宙推進機
- 小型動力源

図１　ムーンショット目標（フュージョンエネルギー）

核融合推進宇宙船「ヴィスタ」

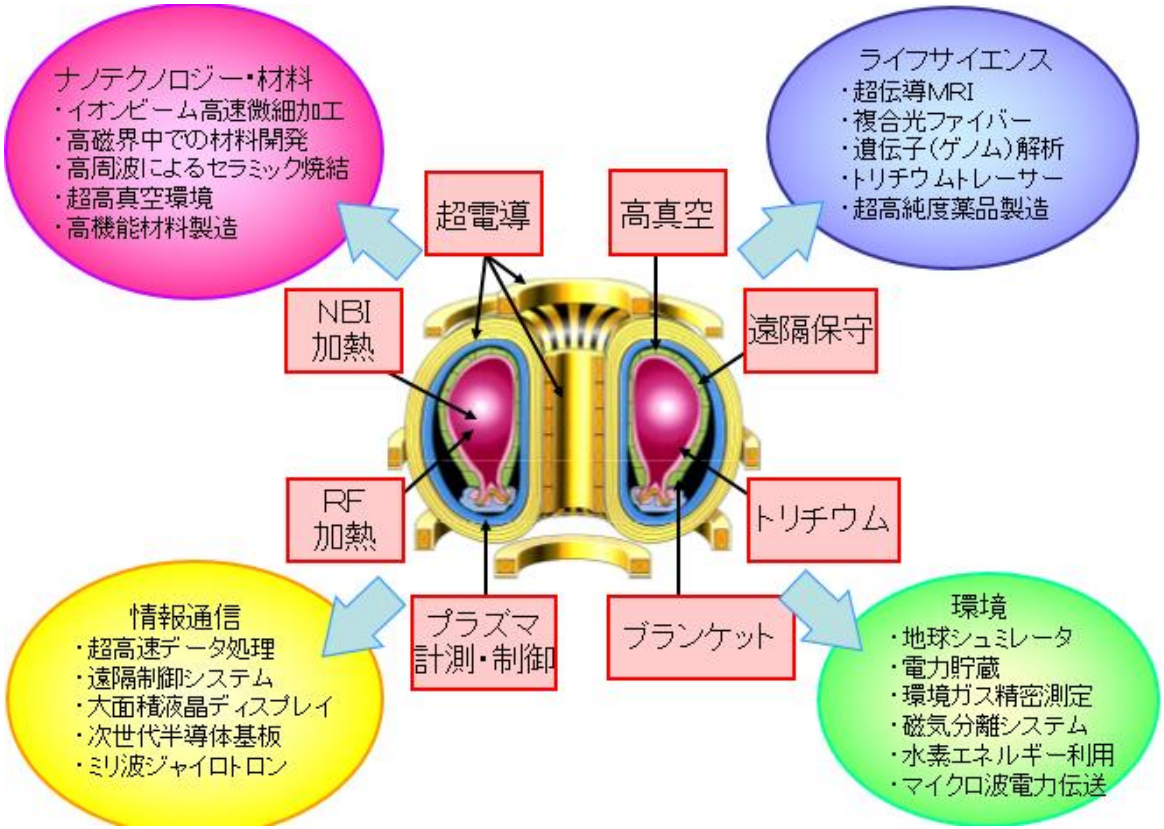




核融合技術の他分野への波及効果

核融合システムが発電等により利益を生み出すのはかなり先になる可能性が高い中、核融合への実現を見据えた研究開発によって利益を生み出すことができれば、研究開発が進めやすくなる。

- レーザーの高効率化、大出力化、精度向上などは、多用途への応用が可能。
- 超電導線材の低コスト化・高性能化が進めばその応用範囲が広がる可能性。
- 核融合を持続的に利用するにはリチウムの確保と同位体分離が必要（天然Liは主に^{6}Liと^{7}Liがあるが、トリチウム増殖に適するのは^{6}Li）。その研究の一環で、高性能のリチウム回収の開発に成功。Liを含む廃液からの回収を当面の目標としてスタートアップ企業を設立。



©2025 IAE

講演アウトライン

- 核融合って何
- 核融合炉システムとその開発シナリオ
- カーボンニュートラル社会における核融合の役割

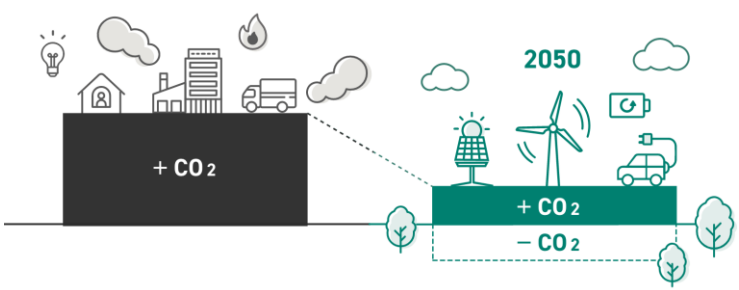
©2025 IAE

パリ協定とカーボンニュートラル

●パリ協定（2015.12）の目標（気候中立）は今世紀後半に人為的な温室効果ガスを正味ゼロにすること

●グラスゴー気候合意（2021）温暖化抑制（Mitigation）: 産業革命前の気温から2度上昇→1.5度上昇目標への踏み込み

カーボンニュートラル（炭素中立）
：Carbon Neutrality
温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させること
「排出を全体としてゼロ」というのは、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの「排出量」から、植林、森林管理、直接CO_2吸収などによる「吸収量」を差し引いて、合計を実質的にゼロにすること。



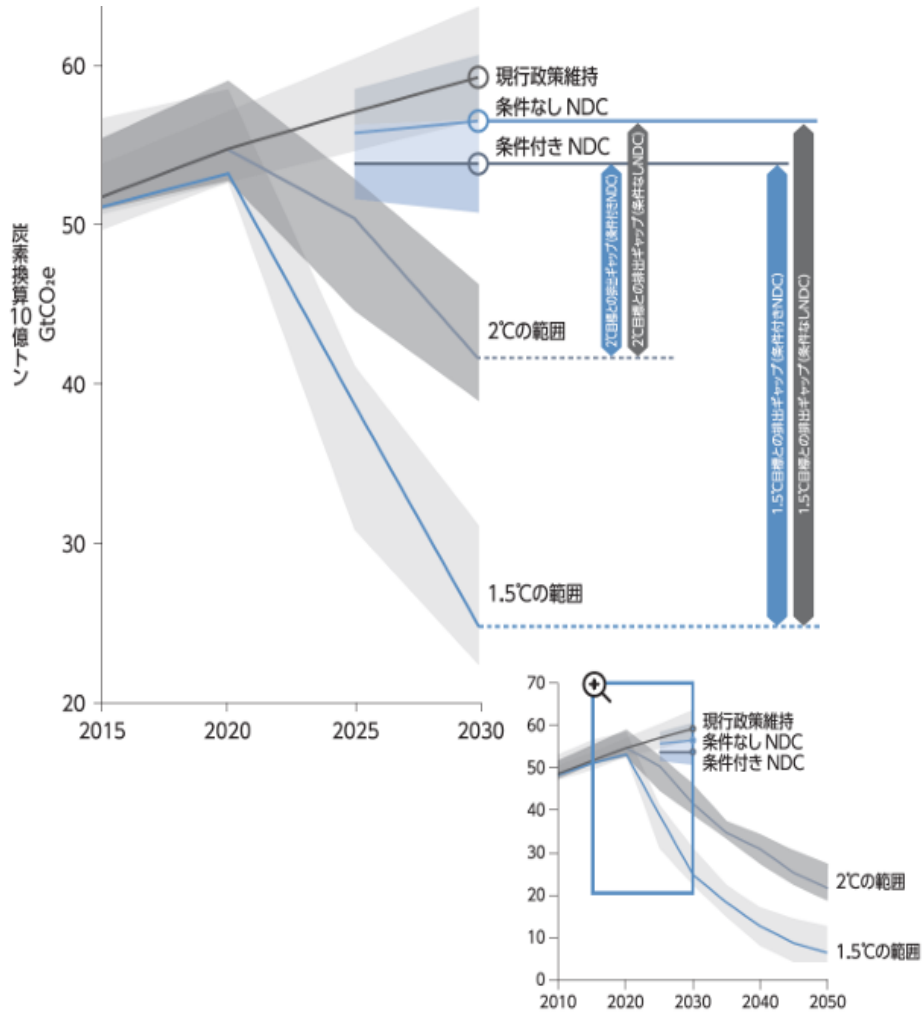
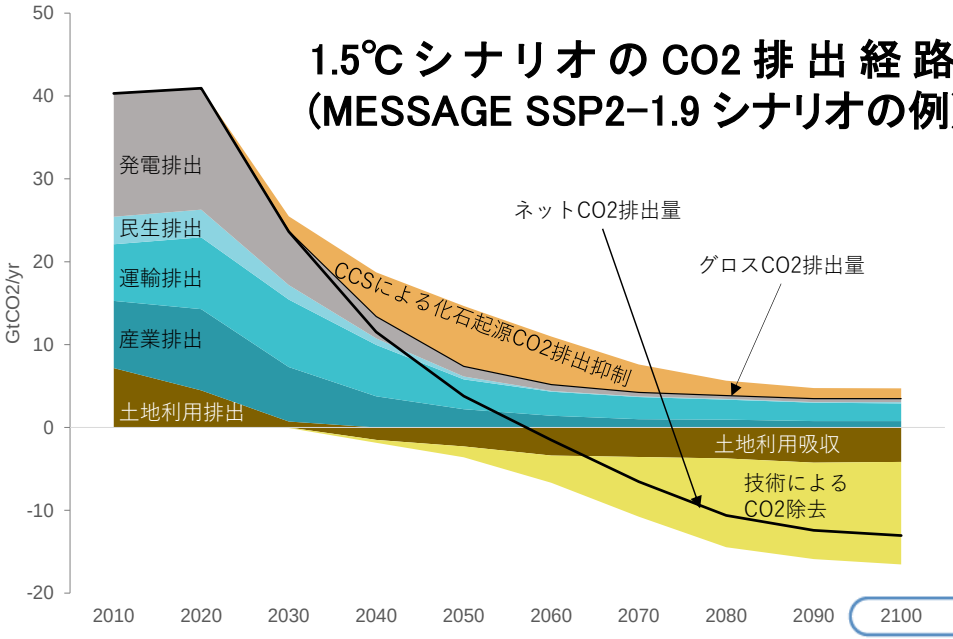


図1.3 2030年までの国別排出目標積み上げと、2℃または1.5℃温度目標達成のために必要な2050年までのGHG排出経路
出典：国連環境計画(UNEP)「Emission Gap Report 2020」(2020)[2]をもとに作成

NDC: Nationally Determined Contribution（国別削減目標）

©2025 IAE

カーボンニュートラルからカーボンネガティブへ



Data from IAMC 1.5℃ Scenario Explorer and Data hosted by IIASA

- 人為的な土地利用や技術によるCO_2除去（ネガティブエミッション技術: NETs）を2030年すぎから利用するシナリオが想定されている

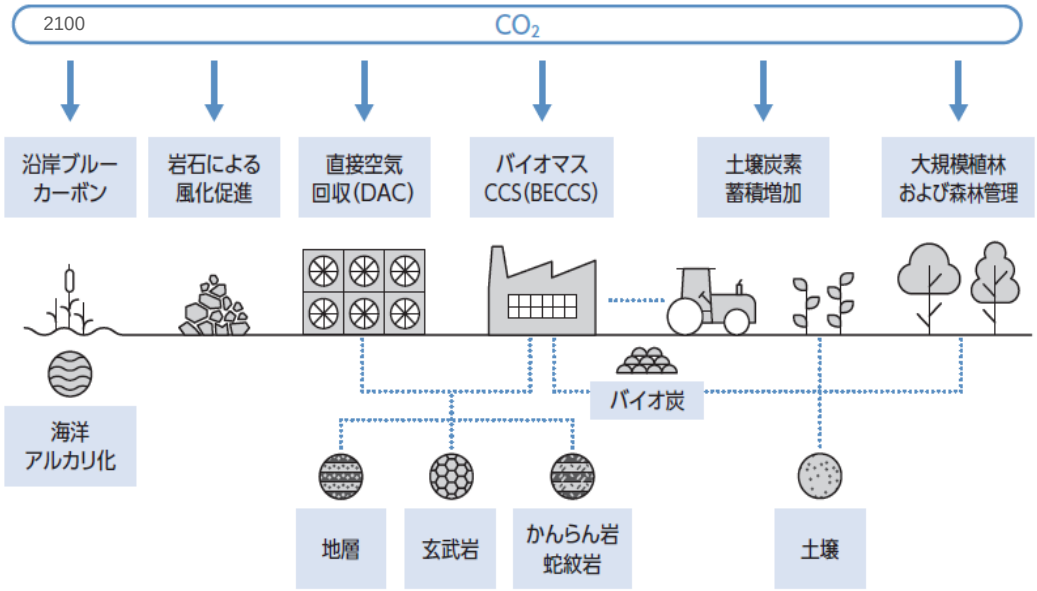


図8.3 主要なネガティブ・エミッション技術

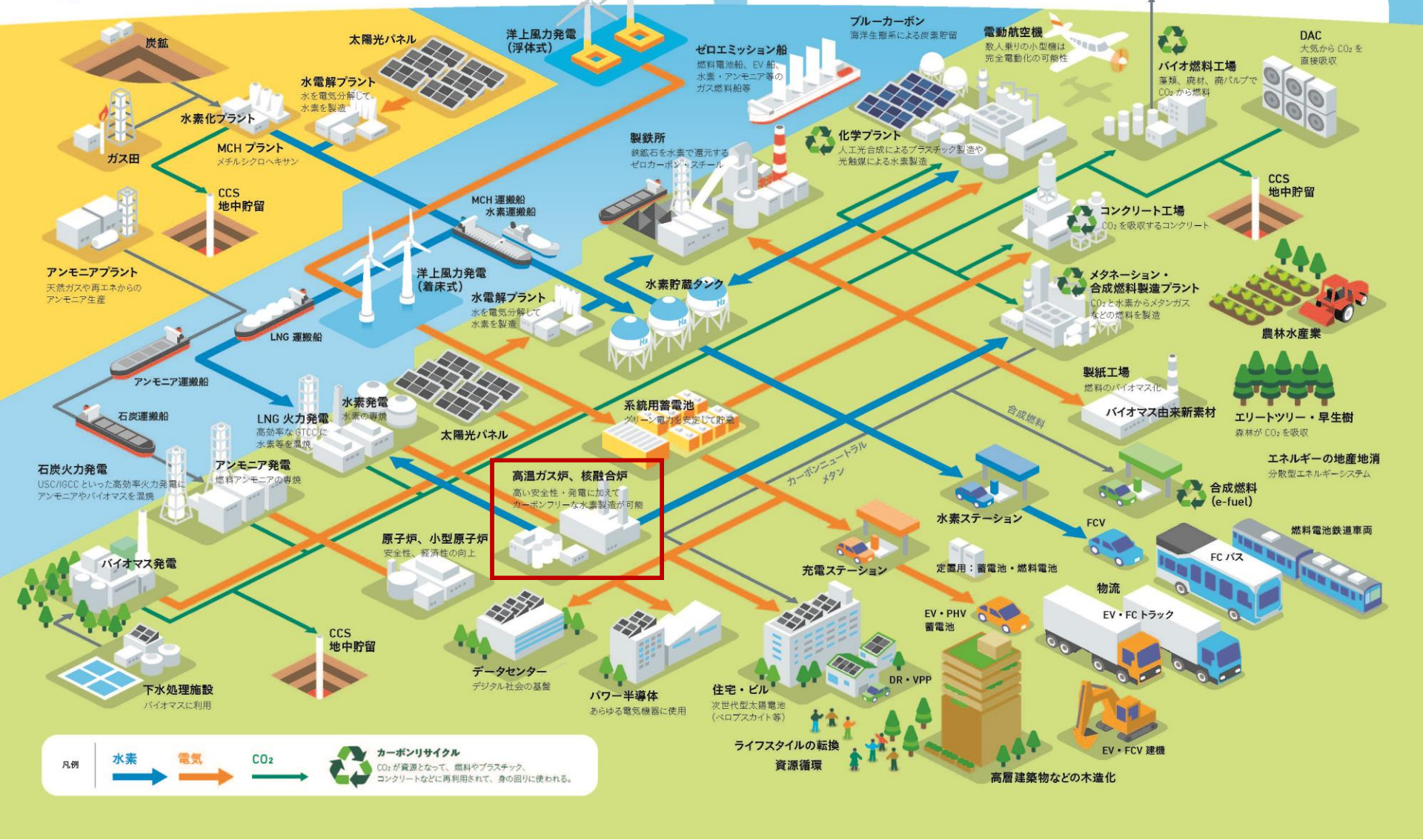
出典：Jennifer Wilcox et al.,「Carbon Dioxide Removal Primer (CDR Primer)」(2021) [5]をもとに作成

©2025 IAE

カーボンニュートラルの産業イメージ

経済産業省

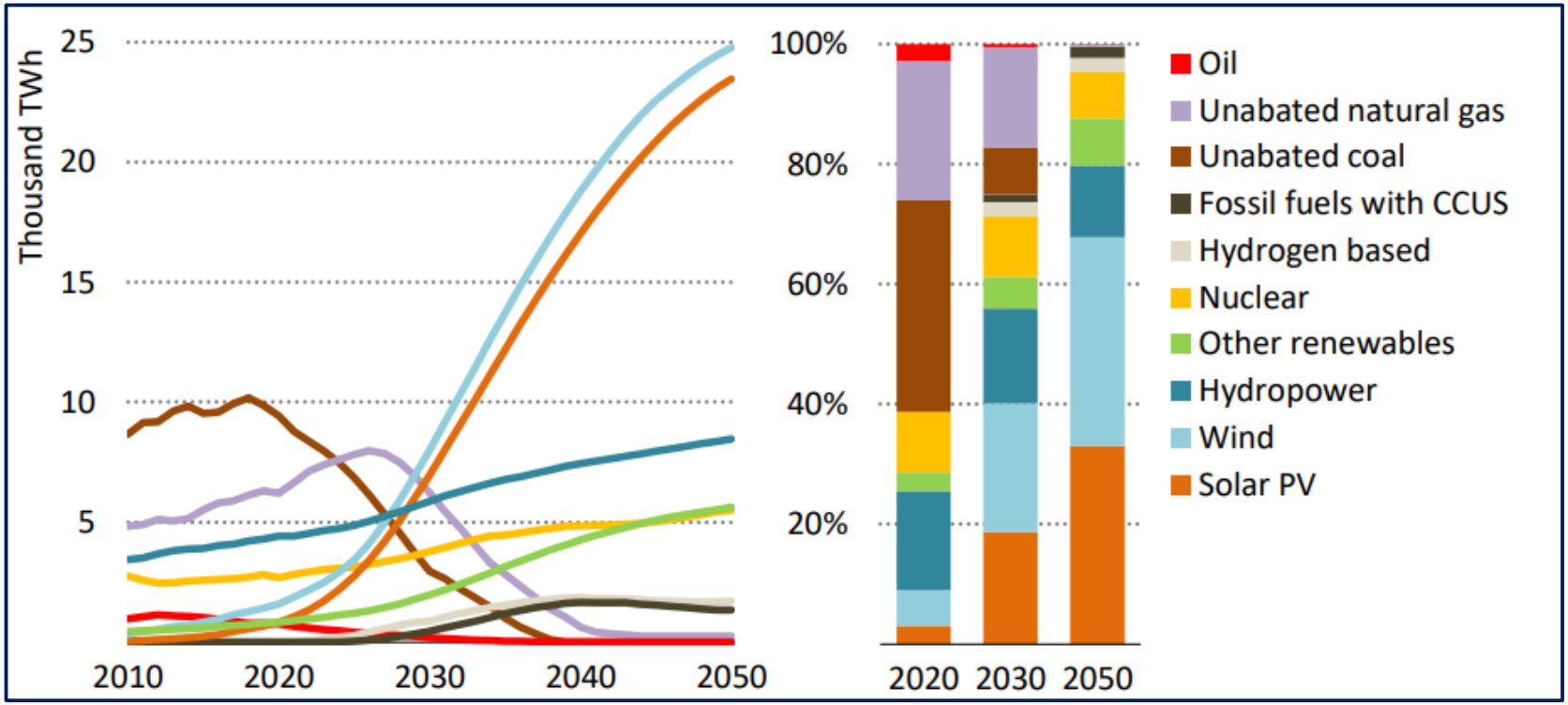
電気はすべて脱炭素化し、産業部門の電化を進める
水素は、発電・産業・運輸など幅広く活用されるキーテクノロジー
CO_2は回収し、カーボンリサイクルや地中貯留（CCS）へ



2050年の世界の発電電力量構成（IEAのNZEのシナリオ）

太陽光と風力発電がリードして、再エネの電力量シェアを2020年の29%から2050年までに90%近くまで押し上げる。原子力、水素、CCUSが再エネを補完する。

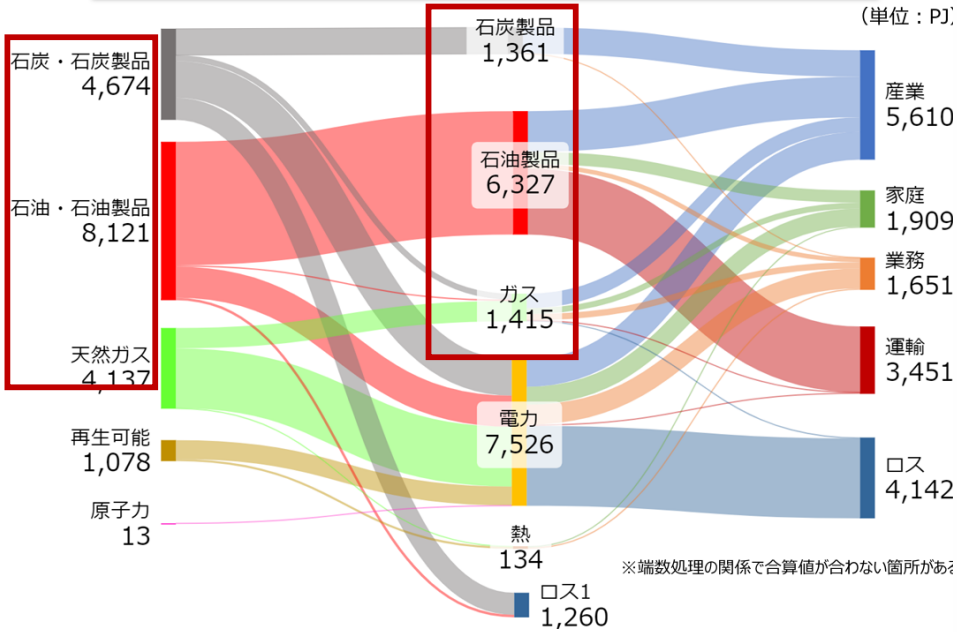
DXの進展で半導体製造工場やデータセンターの増加等により、必要電力量は一層増える予想。



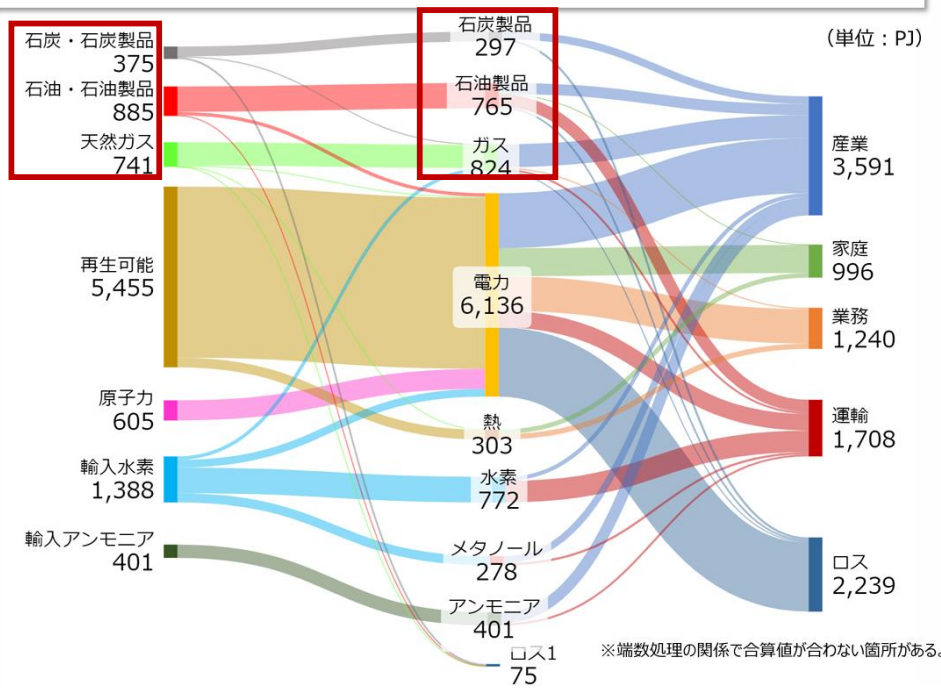
©2025 IAE

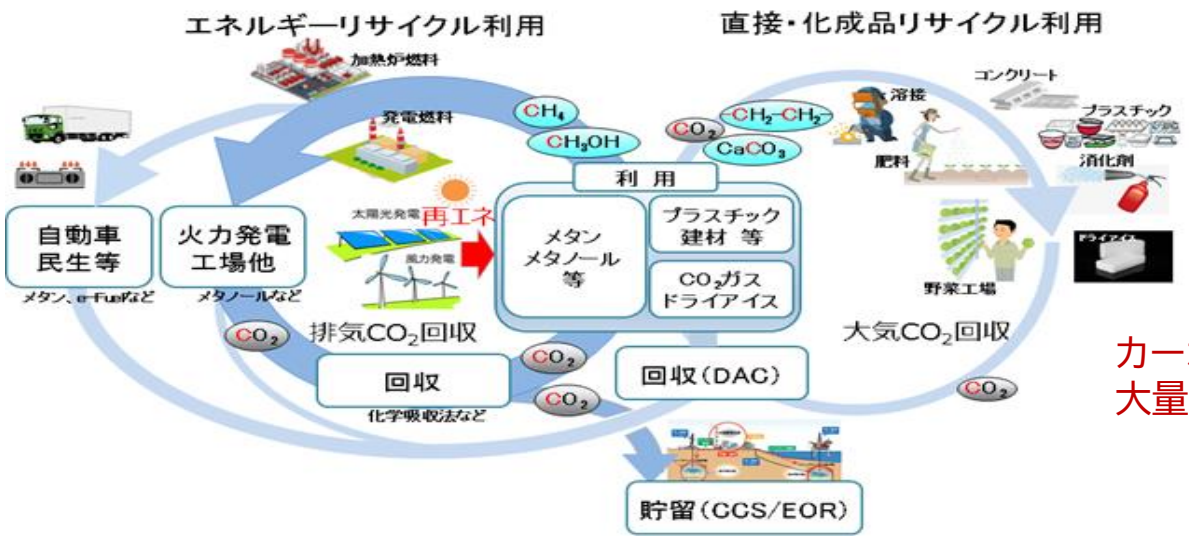
2015年と2050年度の日本のエネルギーフロー

シナリオ分析の基準年（2015年）の日本のエネルギーフロー



シナリオ分析NZ-Baseケースにおける2050年の日本のエネルギーフロー





カーボンリサイクルのためにも
大量のエネルギーが必要

©2025 IAE

カーボンニュートラルの成立条件

- 効用やサービスを低下させずに，エネルギーの効率的利用や，循環利用を含めた**資源の利用効率を向上**

- 脱炭素プロセスによって製造される**ゼロエミッションエネルギーキャリア**，具体的には，電気，水素や，カーボンニュートラル合成燃料の導入拡大．それらの生産において，再エネ，原子力を含めた脱炭素プロセスが採用され，電力供給においては，再エネ大量導入が可能となる強靭かつ柔軟なシステムを確立→**安価な一次エネルギーが大量に供給されることが前提**

- **長寿命な既存の大規模エネルギー需要インフラからのCO_2排出削減**．ゼロエミッションエネルギーキャリアの採用が困難であると考えられるセクターは，素材産業，長距離運輸，既築建築物など

- 排出削減が難しい部門や，農業などのCO_2以外の温室効果ガス排出に対する**オフセット技術としてのネガティブエミッション技術**の認識と導入

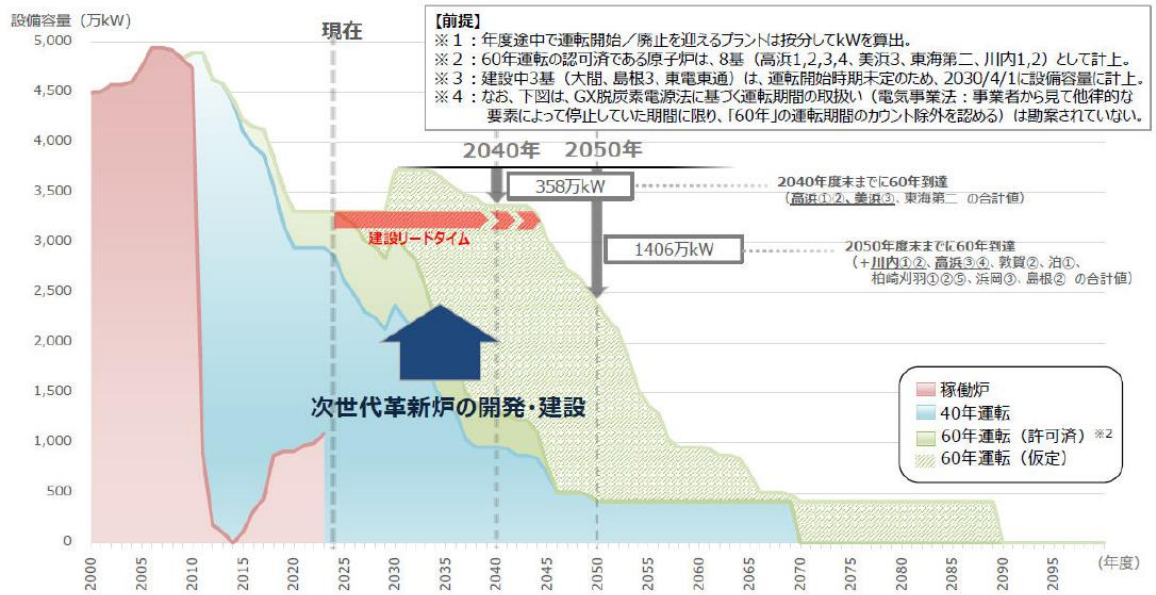
- **幅広い技術群の開発と普及**．成熟技術を普及させ，その間に技術イノベーションを実現し，革新技術の成熟度を高め，コストを低下させた上で大量普及を達成するというシナリオ実現

- カーボンニュートラル実現のための**社会制度整備**．規制的手段，経済的手段に加え，資金の提供者であるファイナンス側からの気候変動情報開示へ対応

©2025 IAE

カーボンニュートラルにおける原子力と核融合

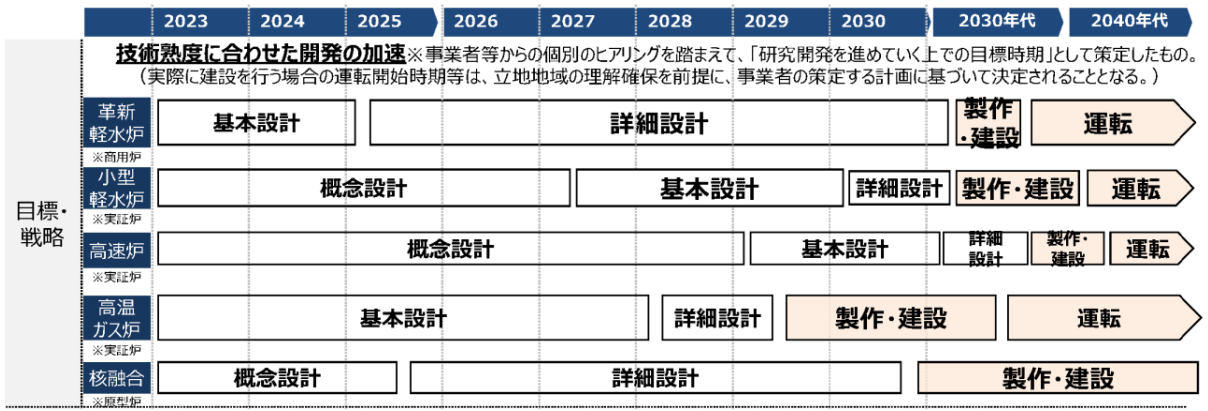
- 再稼働：安全性向上、国民の理解向上、経済性
- 新規建設：2050年超を見据えた建設の重要性
- 革新炉技術：2050年および2050年超を見据えた革新軽水炉、小型モジュール炉、**核融合炉の検討**
- 廃止措置：廃止措置の円滑な実施による、原子力への信頼向上
- 放射性廃棄物処理処分：処分場の確保と法令及び規制の枠組み作りなど



出典）総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料（2024）

過去のエネルギー基本計画においては、ITER計画の推進という文脈で核融合研究を推進することが言及されてはいたが、原型炉建設への言及はなく、将来のエネルギー構成に含まれてないというのが実情であった。

2023年のGXに向けた基本戦略の中で、核融合原型炉についても、2030年代に製作・建設を実施するという図が示された。



©2025 IAE

核融合開発への期待

- 海外からの輸入エネルギーを減らすためには、国産一次エネルギーとしての再生可能エネルギー、原子力などの開発が重要（容量をどこまで伸ばせるか）。核融合（フュージョンエネルギー）はその一つとして位置づけられる。
- そのためには、エネルギー取り出しにおける技術的成立性、経済的合理性、社会的受容性の確立が必須である。
- 国主導の計画の他に、民間主導による開発の加速も重要であるが、カーボンニュートラルにおけるエネルギー問題は2050年で終わるわけではない。社会への貢献においては21世紀後半でもよいのかもしれない。
- 核融合の成果物としては、エネルギー（電気、熱）のほかに中性子利用なども考えられる。
- 新しいアイデアに基づくプラントの検討や要素技術開発も含め、まずはやれるところからやる、という視点が重要ではないか。バイプロダクトや波及成果が、結局は核融合開発を推進する力となる可能性がある。次世代人材の育成や彼らの将来の活躍が強く期待される。

©2025 IAE

ご清聴ありがとうございました