

strategy&

Part of the PwC network

---

# 核融合エネルギー

未来のエネルギー基盤への鍵



# 重要なポイント



## 地球規模の課題と抜本的な解決策

現在の世界的な再生可能エネルギー開発の速度では、2050年までに二酸化炭素を排出しないエネルギー供給が実現する可能性は低い。抜本的な新しいアプローチがなければ、パリ協定の気候変動対応目標は達成できないであろう。核融合エネルギーは、持続可能なエネルギー基盤を目標期限に間に合わせるための不可欠な鍵となり得る。核融合エネルギーの商用化が急ピッチで進み、かつ再生可能エネルギーが最大限のスピードで導入されてはじめて、パリ協定の目標どおり2050年までにネットゼロが達成され得る。



## 決定的な優位性

気候変動に対して中立的なエネルギー源である核融合はベースロードにも対応しており、容易に拡張可能である。運転に必要な資源は世界中で入手でき、安全かつ安価な電力を十分に供給可能である。長期的には、核融合によるエネルギーコストは今日の再生可能エネルギーのコストを下回ると予想される。



## なぜ今なのか

資源、コンピューティング、レーザー研究の新たな進歩により、残された課題は対処しやすいものになりつつあり、発電という目標が手の届くところに来ている。商用化への進展は、核融合事業への民間投資の急増に表れている。最新のアプローチと、イノベーションや意思決定の迅速化により、民間スタートアップは政府よりもはるかに急速なブレイクスルーを目指しており、2030年代での核融合エネルギーの実現を目指している。



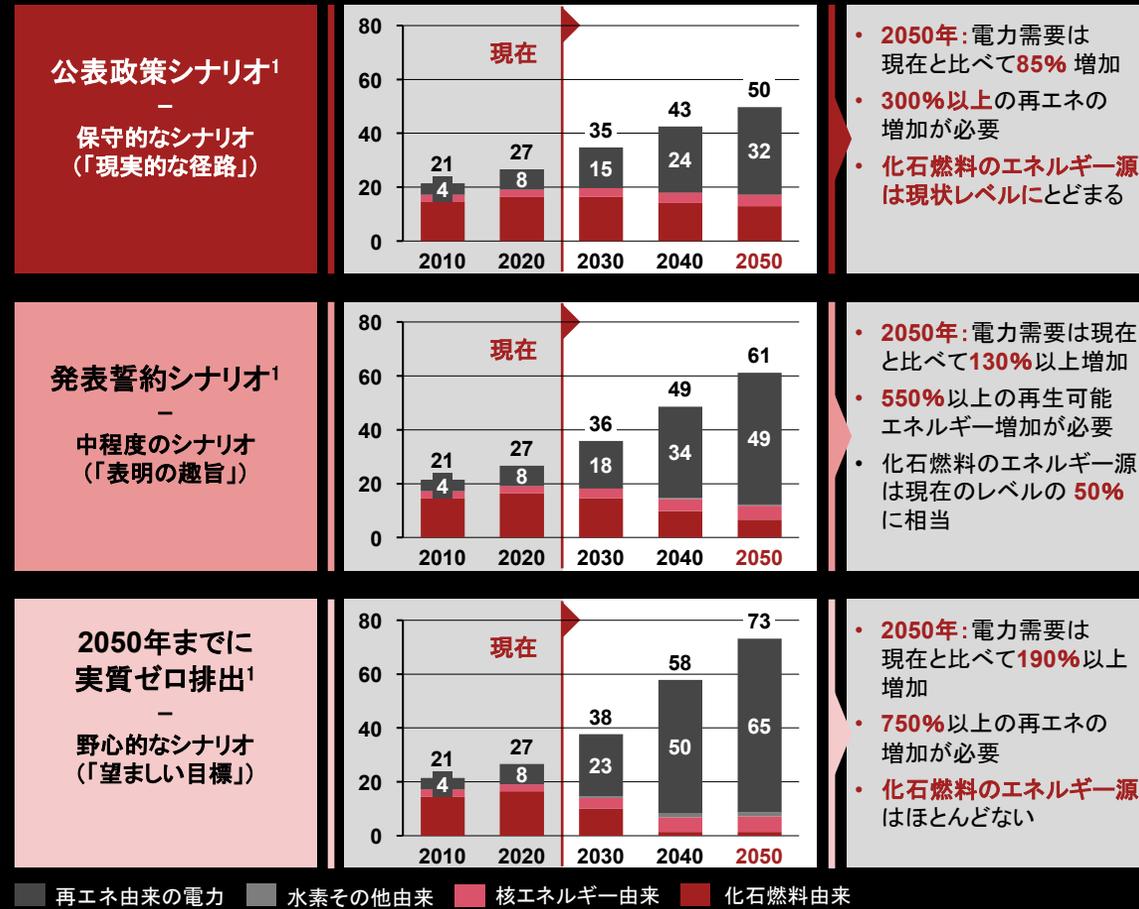
## 戦略

各国は、核融合の初の商用化の競争に向けて態勢を整えつつある。ドイツでは、連邦教育研究省（BMBF）が2023年6月に核融合エネルギーに関する戦略文書を発表した。商用化は経済成長の原動力になる可能性を秘めており、商用化のポジション争いでは核融合エネルギー国家戦略が成功への道しるべとなる。

# 予測：再生可能エネルギーの世界的な増加は、2050年までにエミッションフリーの発電を実現するには不十分

再エネの増加は追加需要をカバーするだけ：社会は依然として化石燃料のエネルギー源に依存している

世界的な電力需要と、供給源ごとに予想されるカバーの範囲(単位 PWh)：



## 不都合な真実：

現在の世界での再エネの増加率は10年あたり約3.3PWhであり<sup>2</sup>、2050年までに実質ゼロ排出のエネルギー供給(実質ゼロ排出シナリオ)は実現しそうにない

世界のエネルギー基盤の変革に対する抜本的に新しいアプローチがなければ、パリ協定の気候変動対応目標の達成には遠く及ばないだろう

# 核融合エネルギーは持続可能で十分かつ安価なエネルギー供給のために、必要不可欠な鍵となり得る

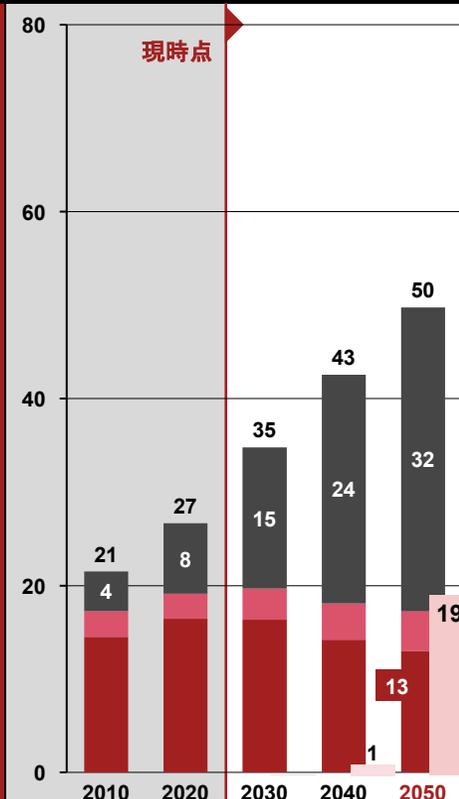
## 考えられる解決策：

核融合エネルギーは、持続可能なエネルギー基盤を目標期限に間に合わせるための不可欠な鍵となり得る

核融合エネルギーの商用化が急ピッチで進み、かつ再生可能エネルギーが最大限のスピードで導入されてはじめて、パリ協定の目標どおり2050年までにネットゼロが達成され得る

世界的な電力需要と、供給源ごとに予想されるカバーの範囲(単位 PWh)：

公表政策シナリオ<sup>1</sup>  
—  
保守的なシナリオ  
(「現実的な径路」)



- 保守的なシナリオ: 「現実的な再生可能エネルギーの増加率」と「そのため化石燃料資源由来の電力への依存度が高い」
- 2030年代の最初の核融合発電所の稼働から、20世紀の**原子力と同等の速度**で加速

2050年:



核融合エネルギーは、2050年まで残存する化石燃料資源由来の電力13PWhの依存を解消することが可能。

■ 核融合由来の電力  
■ 再生可能由来の電力 ■ 水素その他由来 ■ 核エネルギー由来 ■ 化石燃料由来

# 核融合エネルギーとは何か？ - 原理を簡単に説明

原料のリチウムと水の「融合」により、大量のグリーン電力とヘリウムが生成される。



# なぜ今なのか： 新しい技術で発電という目標が達成されつつある

## 資源、コンピューティング、レーザー研究における画期的な進歩

技術的・社会的なメガトレンドが進歩を推進：科学的ノウハウが、持続可能で安価なエネルギーを制限なく供給する、という社会課題に応える。

### 高温超電導マグネット



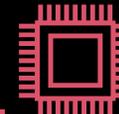
- 新世代の高性能マグネット：最も重要な機械式反応炉の構成要素
- はるかに高い温度での超電導によって初めて、大幅・強力で、より効率的な動作が可能

### 人工知能(AI)



- 研究開発において、AIは新しい資源とプロセスを設計するためのイノベーションサイクルを大幅に加速
- AIによって初めて運転中のリアルタイムで複雑な最適化とパラメータの制御が可能

### ハイパフォーマンス量子コンピューター



- 核融合炉の制御が複雑すぎて扱いにくいことが、これまでのところ商用化の妨げとなっている
- 計算能力は徐々に要求レベルに到達しつつある
- 量子コンピューターは前例のない制御タスクの並列化を可能とする

### 高出力レーザー



- よりコンパクトなパッケージでレーザーのピーク出力が大幅に増加し(10年間で20倍<sup>1,2</sup>)、慣性核融合の新しい設計が可能
- 同時に、レーザーの電力コストも急速に削減された(10年間でPW電力あたり200分の1<sup>1,2</sup>)

# 各国は核融合エネルギーの初の商用化への競争に向けてますます態勢を整えつつある

英国、米国、日本、そして最近ではドイツも核融合エネルギーに関する最初の戦略文書を発表している



## 英国

2021年10月1日<sup>1</sup>

国内核融合産業の形成、商用実証、法的枠組みの構築、官民連携の推進に関する戦略。



## 日本

2023年4月14日<sup>3</sup>

国内ハイテク産業の戦略的・財政的促進による商用化、法的枠組みの整備、官民連携の推進。

## 米国

2022年4月19日<sup>2</sup>

商用化の加速、政府と民間のイノベーションの協力、米国エネルギー省による調整、財政補助金の増加。



## ドイツ

2023年6月23日<sup>4</sup>

「融合エコシステム」と「テクノロジーハブ」の構築、法的枠組みの整備、官民連携の推進。



# 既存の再エネに対する決定的な優位性：核融合エネルギーはベースロード対応可能であると同時に拡張も容易である

現在、拡張性を持ってベースロードに対応できるのは化石エネルギーのみであり、再エネのみが排出量ゼロである。核融合によって初めて両者のバランスがとれる。

	石炭	天然ガス	水力	風力	太陽光	核融合
環境影響	✗	●	✓	✓	✓	✓
資源所要量 (建設)	●	●	✗	●	●	●
資源所要量 (運転)	✗	✗	✓	✓	✓	✓
依存性 (対EU外部)	✗	✗	✓	●	✗	●
拡張性	●	●	✗	✓	✓	✓
ベースロード対応	✓	✓	✓	✗	✗	✓

✓ 低
● 中
✗ 高

 温室効果ガスの排出なし

 唯一のベースロード対応可能な再エネ技術

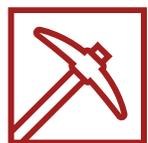
 天候や日中の時間に左右されずに利用が可能

 核融合の燃料はドイツ国内で調達が可能

# 世界中で利用可能な資源由来の核融合による電力量は、安全で安価な電力を供給するのに十分である

最小限の量で電力需要全体を賄うのに十分である:

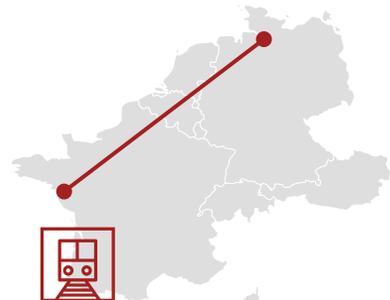
「一般的な」1,000MW発電所の資源所要量



石炭

年間320万トン

ハンブルクからナントまでの  
の貨物列車相当



距離1,100km



天然ガス

年間130万トン

ハンブルクからイスタンブール  
までの貨物列車相当



距離1,900km



風力

250基のタービン  
(陸上4MWクラス)

ドイツが現在4か月かけて  
建設するのと同量



太陽光

太陽光発電3,400万m<sup>2</sup>

ベルリンのミッテ地区の  
総表面積相当



核融合

年間250kgの燃料

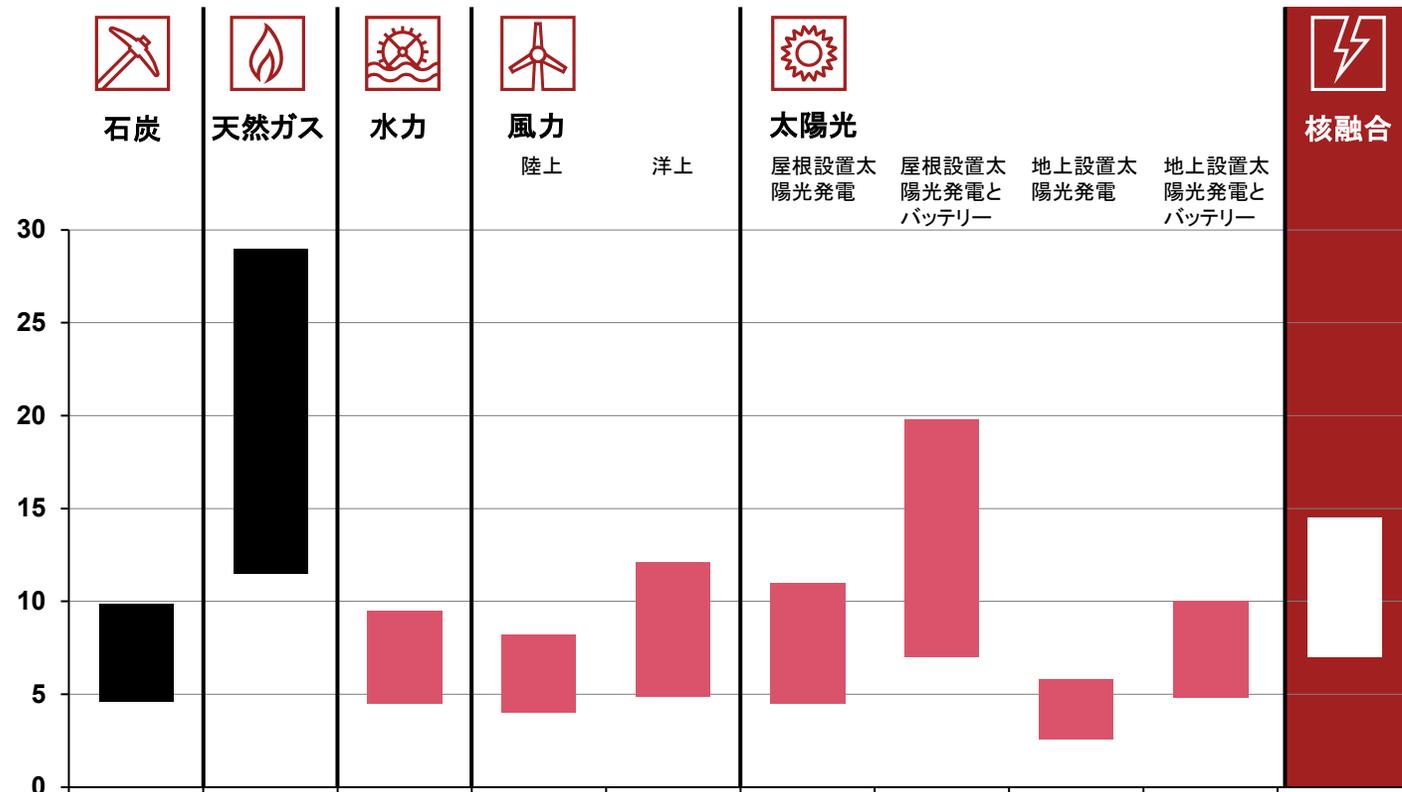
発電所まで片道だけの  
輸送荷重



# 規模の経済により、核融合による電力の価格は再エネと同等か、 またはそれよりも低くなる

開発と建設は核融合の生涯コストの70%以上を占めるが<sup>3</sup>、拡張によりこれらは大幅に減少する。

平準化された電気料金(ユーロセント/kWh)<sup>1-5</sup> (発電における電力の生涯コスト)



現在の研究<sup>2</sup>では、核融合エネルギーは今日の再生可能エネルギーと同等の電力価格を達成すると予想されている。

小規模な商用核融合の考案により、初期投資額が削減され、電力価格を今日の再生可能エネルギーよりも低く抑えることも可能になり得る。

技術の成熟に伴い、核融合は(運用コストが低い他の発電技術と同様)初期投資後のコストが減少する。

例えば、近年の発電コストは、風力は70%、太陽光は90%低下した<sup>4</sup>。

# 核融合が商用として成熟するまでに残された課題は、現在利用可能な技術で対処できると予想される



## エンジニアリング



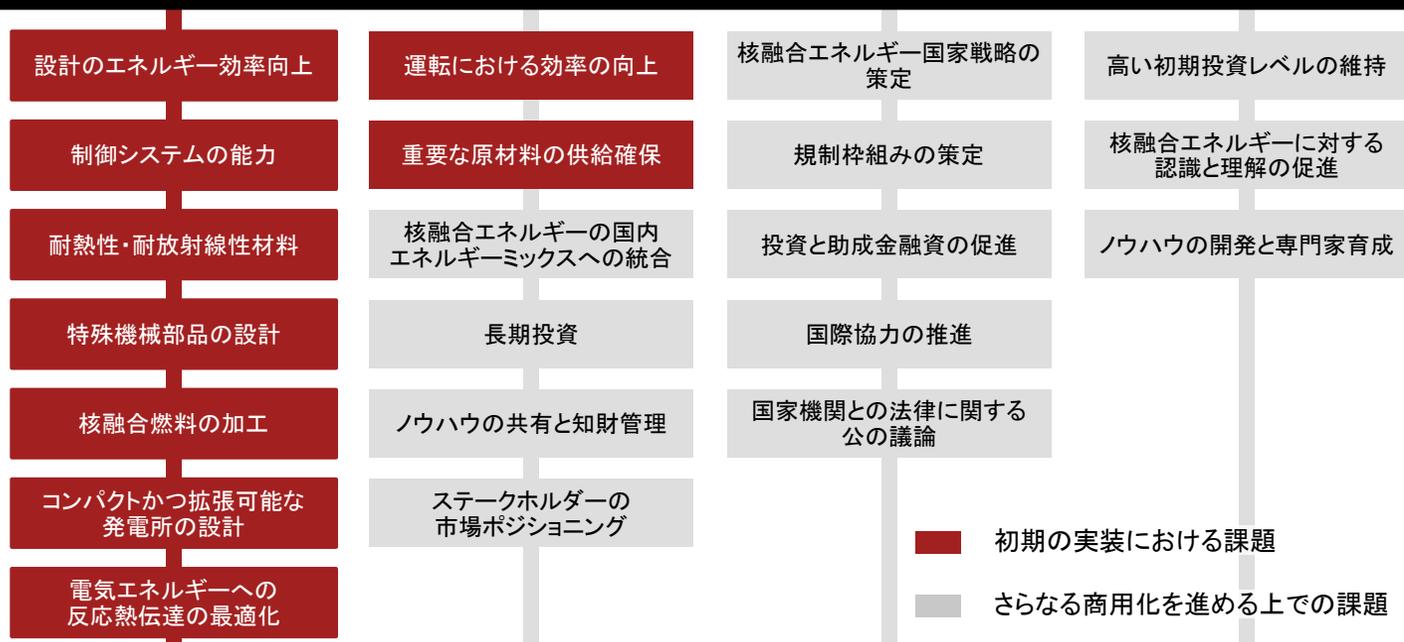
## 経済



## 政治



## 戦略



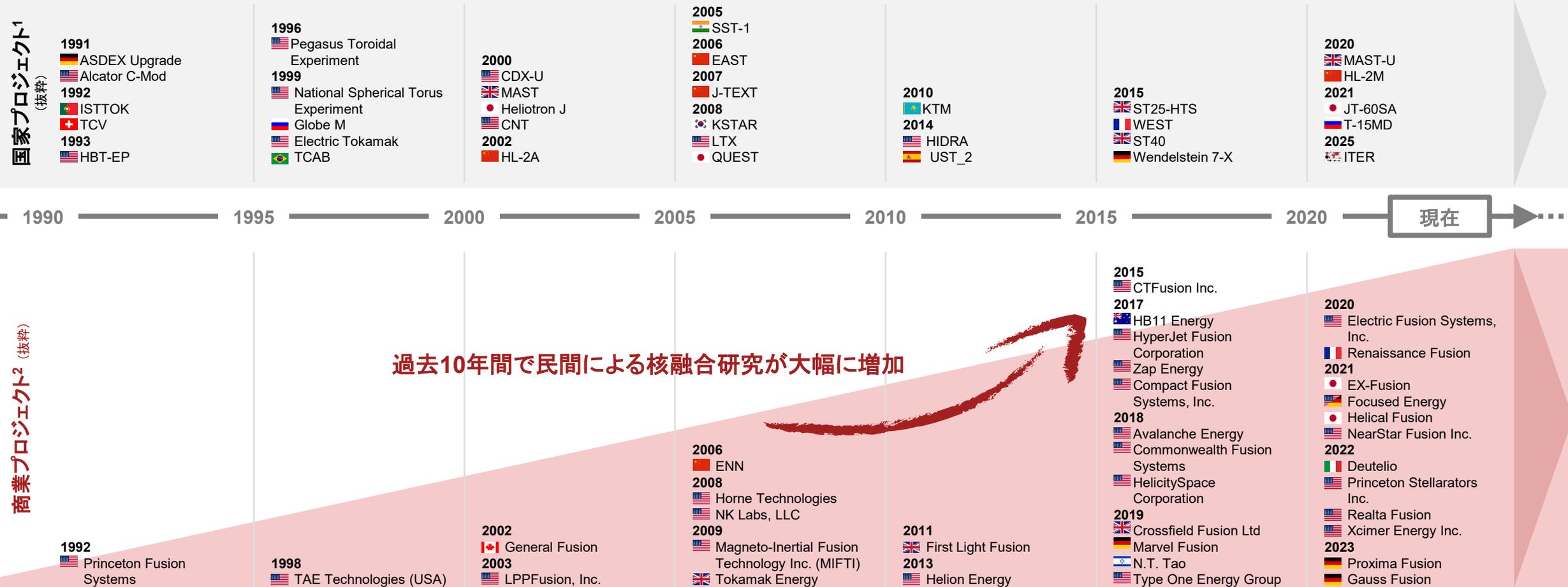
最初の高性能核融合発電所が建設できるようになるまでには、解決すべき課題がまだ数多くある。これらの課題のほとんどは、エンジニアリングの課題などである。

現在の焦点は、連続運転における消費電力よりも多くの出力を生み出す反応炉（「実証反応炉」）の構築にある。

これまでの主な技術進歩（人類初の飛行、初の原子力発電）と同様、この実証は、さらなる開発を急速に加速する火付け役となり得る。

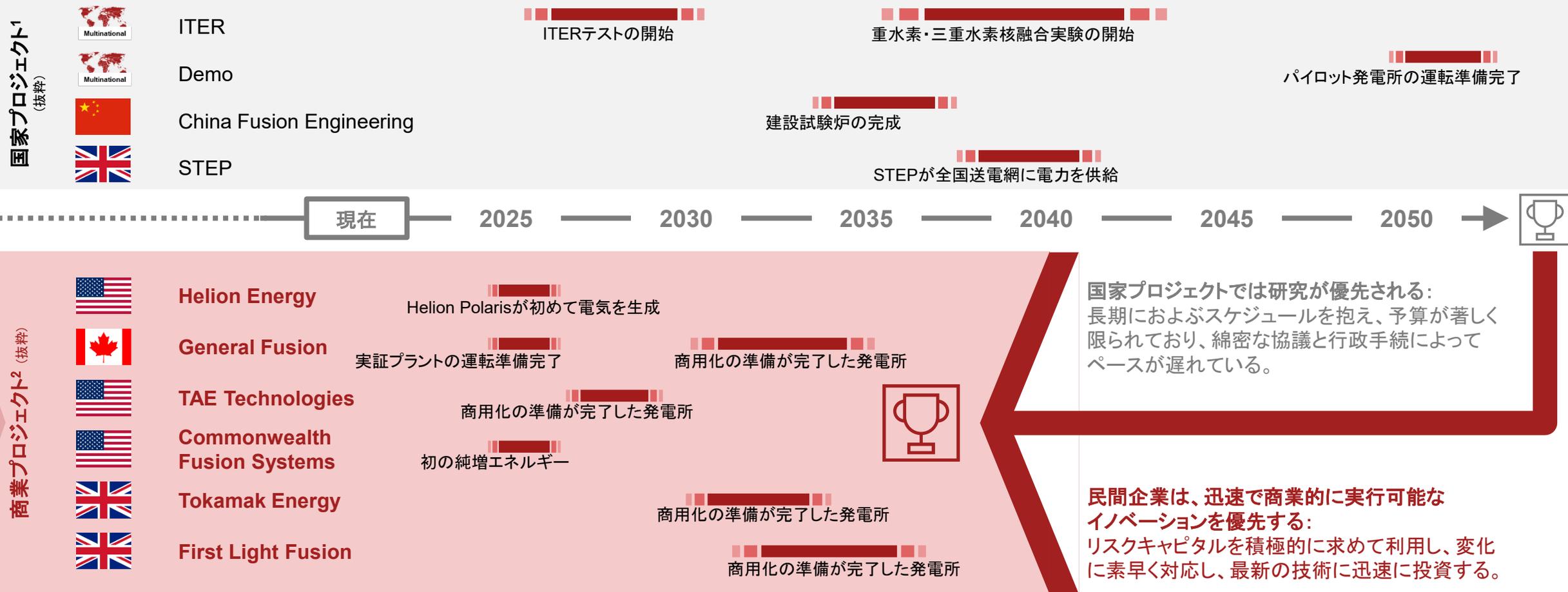
# 商用化に向けた進展は、最近の民間核融合スタートアップの大幅な増加に現れている

核融合エネルギーの商用化に向けた国際競争が始まった:さまざまな核融合プロジェクトの潮流



# 民間企業は政府の研究機関よりもはるかに早い2030年代の実現を目指している

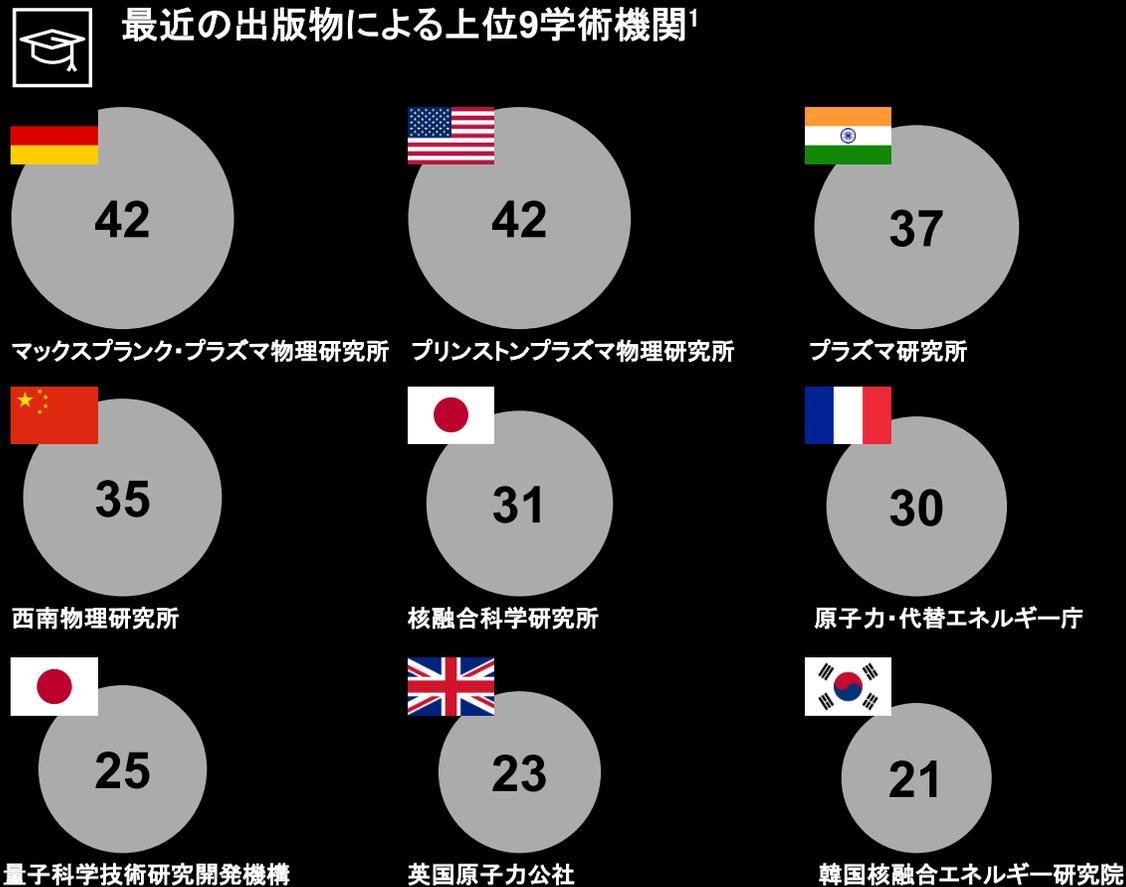
より現代的で拡張可能なアプローチと、より迅速なイノベーションと意思決定サイクルによる加速



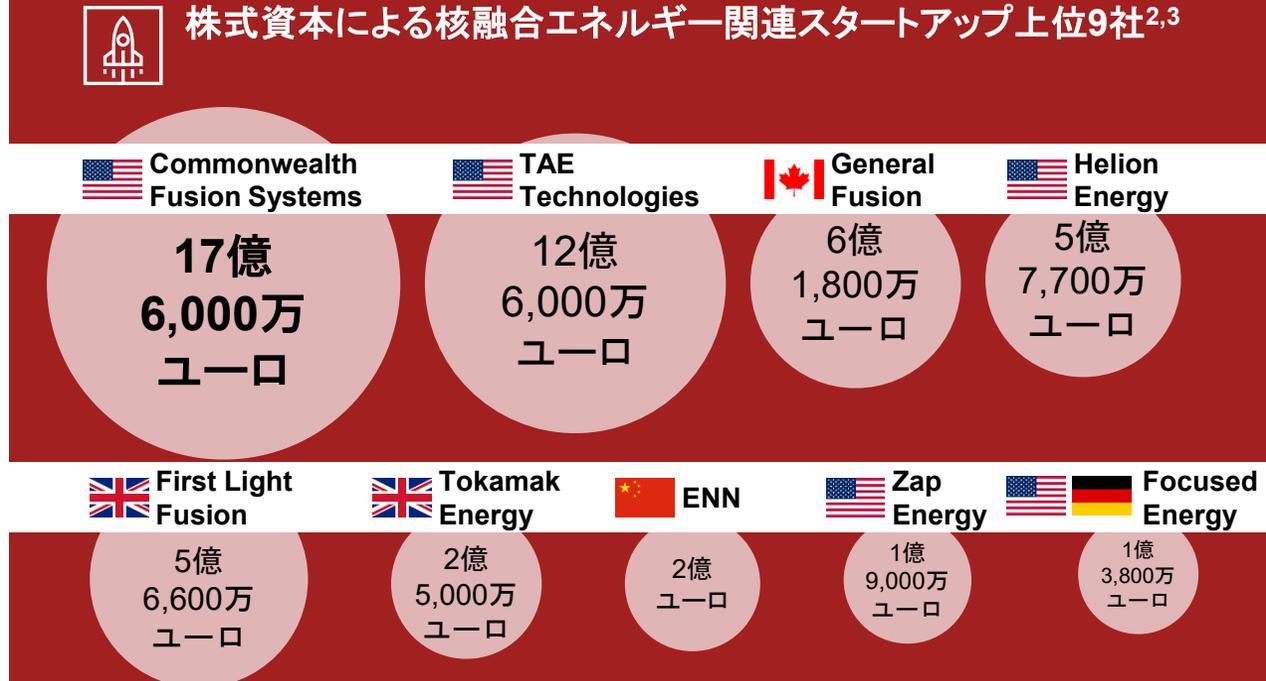
# 民間投資に委ねるだけでなく、各国では初の商用核融合エネルギーを巡り、学術面や国家予算による支援も進む

学術機関、起業、国家予算において各国の差が生まれつつある

## 最近の出版物による上位9学術機関<sup>1</sup>



## 株式資本による核融合エネルギー関連スタートアップ上位9社<sup>2,3</sup>



## 主な国家核融合エネルギー研究の年間予算<sup>4,5</sup>



# 核融合の商用化に向けて各国のポジション争いが続く中、核融合エネルギー国家戦略の策定が重要性を増している

核融合エネルギー国家戦略は、政府と経済活動の間で必要とされる緊密な連携の根幹である

カーボンニュートラルで安全かつ安価なエネルギー供給の実現のための**国家的優先事項**。

開発と導入のための**ガイドライン**と、免許手続きや資金調達プロセスにおける**官僚的なハードルの軽減**。

政府機関と業界パートナー間での**連携の調整と推進**。

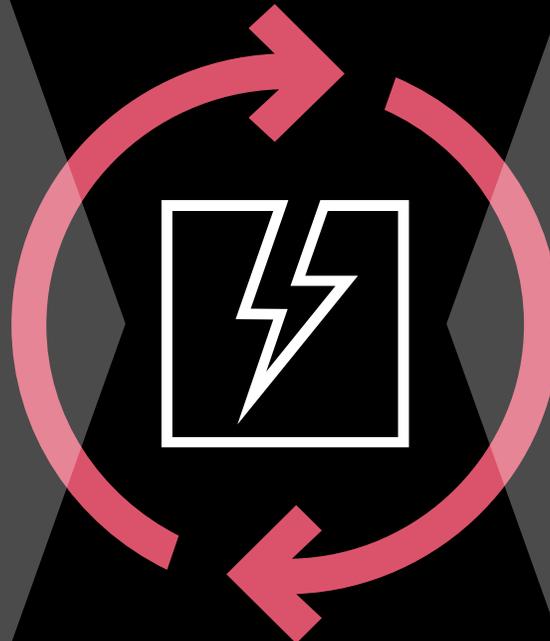
国内レベルおよび国家レベルでの**政府の補助金と融資プログラム**。

スタートアップと民間部門のイノベーションの温床としての、民間ベンチャーキャピタルに対する**政府の再保険**。

将来の戦略的技術をより迅速に市場に投入可能とするため、**国のエネルギー問題を調整するための国家レベルでの意思決定の役割の形成** - 米国エネルギー省を将来的な青写真として。

**戦略的なサプライチェーンの実現**と、重要な原材料、技術、コンポーネント、人材の確保。

政府



経済活動

核融合エネルギーを伴う経済環境下における**市場の役割分担の明確化**。

核融合発電所を既存のインフラに**統合する準備としてのアセットマネジメント**。

投資家の要件や、「座礁資産」のリスクを最小化するためのシナリオに沿った投資などの**透明性のある資金調達戦略の策定**。

スタートアップから重要なアセットインフラストラクチャの事業者までの**成長過程における組織構造**。

分野を超えたテクノロジーの活用と非連続的ビジネス成長のための**戦略的提携とM&A**。

世界中で最高の人材を獲得、育成するための**タレントマネジメント**。

知識の交換、結果重視のファンド活用、重要なノウハウの保護とのバランスを最適化するための**イノベーション戦略と知財管理**。

政治的意思決定者と一般人に対する**マーケティングおよびコミュニケーション戦略（広報）**。

# 核融合エネルギーの商用化の実現に向けた、 国の行動アジェンダの設定が求められる

## 実現に向けた推奨事項



**戦略**: 最初の発電所を可能な限り早期に導入するための、成功に基づく報奨を伴う核融合エネルギーロードマップの導入



**予算編成**: 研究開発に対する予算の効果的な編成のため、国家レベルでのエネルギー問題に関する意思決定の役割を確立



**資金調達の簡素化**: 民間部門のイノベーションに対する効果的かつ非官僚的な資金提供と支援メカニズムの確立



**経済発展**: 国内経済における力強い核融合産業の発展を可能にする法的枠組みの導入



**トレーニング**: インセンティブ、広範な広報活動やターゲットを絞った人材獲得を通じ、ドイツで必要なノウハウを醸成

# 執筆者



**Stephan Ruehl**  
パートナー

エネルギー・電力・資源



**Artur Korinski**  
マネージャー

エネルギー・電力・資源

# 監訳者紹介

## 桑原 永尚(くわはら・ながひさ)

PwCコンサルティング合同会社、Strategy&のシニアマネージャー。エネルギー業界における事業戦略、新規事業開発、構造改革に関する豊富な経験を有する。近年はエネルギー×モビリティをテーマに、EV・FCVのアプリケーション展開、充電サービス等の供給システムとVPPへの統合といった新たなエネルギー市場創造に向けた展開アプローチを中心に手掛ける。

---

本報告書は、PwCメンバーファームが2023年に発行した「The fusion revolution Powering tomorrow's world with clean energy」を翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、オリジナル(英語版)との解釈の相違がある場合は、オリジナルに依拠してください。<https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/energy-utilities/fusion-energy.html>

日本語版発刊年月:2024年6月

## 問い合わせ先

PwCコンサルティング合同会社 ストラテジーコンサルティング(Strategy&)





**[strategyand.pwc.com/jp](https://strategyand.pwc.com/jp)**

© 2024 PwC. All rights reserved. PwC refers to the PwC network and/or one or more of its member firms, each of which is a separate legal entity. Please see [www.pwc.com/structure](https://www.pwc.com/structure) for further details. Mentions of Strategy& refer to the global team of practical strategists that is integrated within the PwC network of firms. For more about Strategy&, see [www.strategyand.pwc.com](https://www.strategyand.pwc.com). No reproduction is permitted in whole or part without written permission of PwC.

Disclaimer: This content is for general purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.