J. Plasma Fusion Res. Vol.102, No.10 (2026) 442-446

研究・技術ノート

日本製核融合炉のガラパゴス化を防ぐために
～工学的PDCAサイクル，技術伝承，コストおよびエネルギーセキュリティからの炉規模論～

Avoiding Technological Isolation and Loss of Global Competitiveness of Japanese Fusion Reactors
— Reactor Scale Perspectives based on Engineering PDCA Cycles, Knowledge Transfer, Cost and Energy Security —

嶋田道也[1)]，竹内　浩[2)]，佐々木崇[3)]，大川慶直[4)]
SHIMADA Michiya[1)], TAKEUCHI Hiroshi[2)], SASAKI Takashi[3)] and OHKAWA Yoshinao[4)]
[1)]元量子科学技術研究開発機構，[2)]元金属技研，[3)]元三菱核融合開発室，[4)]元日本原子力研究開発機構

（原稿受付：2026年7月27日／原稿受理：2026年9月14日）

日本の核融合技術の社会実装に向け，大型低温超伝導炉（Q-DEMO）から主半径4 m級の高温超伝導（HTS）コンパクト炉への戦略的移行を提言する．大型炉路線は保全性，稼働率，技術伝承，ヘリウム資源制約，発電コストにおいて構造的限界を抱える．これに対しコンパクト炉は，炉内機器の保全容易化による高稼働率の確保，10年以内の建設サイクルによる確実な技術伝承，ヘリウム消費を大幅に抑制する伝導冷却や閉サイクル冷却による資源リスク回避，電力単価削減とコスト抑制を可能にする．また，過酷な高熱負荷課題を早期に検証する実機プラットフォームとしても優れる．QST等の知見と国内メーカーの技術を結集し，官民融合の特別目的会社（SPC）を経て電力会社主体へ段階的に体制転換する開発・事業モデルを構築することで，2030年代以降の国際商業競争における我が国核融合技術のガラパゴス化を防ぎ，社会実装を実効的に推進すべきである．

Keywords:
fusion reactor, PDCA cycle, knowledge transfer, HTS: High-Temperature Superconductor / LTS: Low-Temperature Superconductor, blanket, divertor, remote maintenance

1．緒言（背景と問題提起）

我が国の核融合研究開発は，長年にわたる地道な基礎・学術研究から，「実用化・社会実装」を強く意識するフェーズへと移行している．ここで大前提として強調すべきは，現在の我が国が世界トップクラスの核融合技術と知見を有しているのは，旧日本原子力研究所（JAERI）から現在の量子科学技術研究開発機構（QST）に至る国家プロジェクトの牽引のみならず，核融合科学研究所（NIFS，1989年設立）や全国の大学，物質・材料研究機構（NIMS），産業技術総合研究所（産総研），電力中央研究所（電中研）などの諸機関が連携し，また，産業界の支援も受けて，多様な英知と人材を結集してきた「オールジャパン（全日本）」の不断の努力の賜物であるという事実である．我が国ではトカマク型にとどまらず，大型ヘリカル装置（LHD）等を通じたヘリカル型やレーザー等による慣性核融合など，多様な炉形式・閉じ込め概念における物理・工学基盤の開拓が進められてきた．

こうした全日本的な研究成果が集約される中で，我が国の国家戦略における基幹電源化ロードマップの基軸となってきたのが，原子力委員会核融合専門部会報告書「今後の核融合研究開発の推進方策について」（2005年）[1]に示された「JT-60」→「ITER」→「原型炉」→「実用化」という低温超伝導（LTS）材料を前提とする大型炉開発路線である．この路線を具現化する設計研究として取りまとめられたQ-DEMO[2]は，ITER，幅広いアプローチ（BA）活動，JT-60SAで蓄積された物理・工学的知見を統合した，我が国トカマク研究の集大成と言える．

しかしながら，ITERの概念設計が策定された2000年代初頭の段階では，高温超伝導（HTS）線材の工学的適用性や長尺線材の信頼性は未確立であり，当時の技術判断としてLTSの採用が必然的であった．一方で，近年のHTS技術の飛躍的進歩や，英国STEPにおける球状トカマク（ST）炉計画，海外スタートアップによる高磁場コンパクト炉開発など，世界的な核融合開発のパラダイムシフトと商業化競争は急速に激化している．

こうした国際情勢を踏まえると，従来の大型LTS炉路線は，「保守性（Maintainability）」「稼働率（Availability）」「技術伝承」「地政学的資源制約」，そして「電力単価（LCOE）」という工学・事業マネジメントの観点において，実用化に向けた課題が顕在化しつつある．特に，設計

Corresponding author's e-mail: michiya.shimada@gmail.com

©2026 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

（Plan：計画）→建設（Do：実行）→運転・評価（Check：評価）→改良（Action：改善）という工学的PDCAサイクルを迅速に回し，技術者の現役期間内に生きた技術を次世代へ確実に継承していく観点からは，建設・改修に長期を要する巨大炉特有の時間的スパンの長さが課題となり得る．

日本のDEMO設計研究[3-11]は，ブランケット，ダイバータ，材料，保守性といった成立性の主要課題を体系的に扱い，大型炉に固有の工学的課題を早期から認識してきた．本研究は，これまでのITERや国内のDEMO設計研究が積み上げてきた貴重なプラズマ物理パラメータや基本的仕様を妥当な基準値として尊重しつつ，最新のHTS技術や材料特性を前提とした再評価および概念設計の再構築を試みるものである．

全日本の研究機関，大学，産業界が長年培ってきた世界最高峰の知見と人材力を次世代へ着実に引き継ぎ，将来の国際競争の中で日本の技術を真の社会実装へと結実させるためには，主半径4m級のHTSコンパクト炉という選択肢を視野に入れ，柔軟かつ戦略的な開発・事業体制の移行を検討することが極めて重要であると考えられる．本論文では，トカマク型原型炉開発の蓄積知見を軸としつつ，工学的PDCAサイクル，保全工学，資源セキュリティ，および官民融合による段階的開発体制の観点から，今後の我が国の核融合開発の推進方策について提言を行う．

2．主要論点と工学的分析

①炉内機器の「消耗品性」と保全の容易さ（Maintainability）による稼働率（Availability）の確保

核融合発電がビジネスおよび既存の系統電源として成立するか否かの最大の決定打は，プラズマの加熱・閉じ込め性能（Q値）にとどまらず，「過酷環境下で劣化する炉内機器をいかに短期間かつ確実に保全・交換できるか（Maintainability）」に強く依存する[12-14]．ブランケットやダイバータは，過酷な14MeV中性子照射や熱負荷（10 MW/m^{2}超）に直接さらされるため，数年ごとの定期交換・改良が避けられない「消耗品」であり，交換作業の複雑性は稼働率（Availability）を直接規定する．

- 大型炉の構造的ボトルネック（低稼働率リスク）：
  巨大炉では，ブランケットを縦方向の巨大セクターとして交換するVSTM方式が検討されている．Utoh[6]は，配管接続，位置決め，搬出入の工学的難易度を詳細に評価し，巨大炉では交換作業が構造的に困難であることを示した．EUROfusionのDEMO設計統合研究[13, 14]では，ブランケット交換を含む遠隔保守（RM）がDEMOのプラント可用性を左右する主要因であることが示されている．Federici[14]も，可用性は保守性（MTTR）に強く依存することを示している．

これらの知見を踏まえると，巨大炉では商業炉として必須の70–80%の高稼働率を達成することが構造的に困難となる．

- コンパクト炉の機動性と保全工学：
  炉規模をコンパクト化すれば，炉内機器の重量・サイズが劇的に縮小され，遠隔保守のハンドリング工程が簡素化される．これにより交換サイクルが短縮され，稼働率を高く維持できる．さらに，実機で迅速に試験し，問題があれば即座に交換・改良できるため，高速な工学的PDCAが成立し，TRL（技術成熟度）が飛躍的に向上する．

②「人間のキャリアの長さ」に立脚した技術伝承と10年上限ルール

最先端工学の社会定着において最も重大なリスクは，「設計・建設・運転・トラブルシューティング」という一連のリアルな実機経験が，次世代に生きた教訓として伝承されないことである．

- 「技術者のキャリアスパンと建設期間の不整合」の限界：
  ITERの30年以上の建設期間が示す通り，大型炉路線は一人の研究者，技術者の現役期間（30～40年）のすべてを1基の建設だけで消費してしまう．これでは技術の進化も伝承も極めて非効率になる．
- 「10年以内」の戦略的妥当性：
  コンパクト炉は，技術者が「設計→建設→運転→改良」を10年以内に経験できるため，技術伝承の観点でも極めて合理的である．

③国際的な実機開発・商業化競争におけるガラパゴス化の回避

海外では，米英中を中心に高磁場コンパクト炉の実証および将来の商用展開に向けた実機建設競争が急速に進展している．これに対し，我が国が巨額の国費と数十年もの歳月を投じて従来の巨大LTS原型炉に固執した場合，完成時点において国内外の市場から「高すぎる，遅すぎる」と評価され，我が国の核融合工学が国際市場から孤立・排除される（ガラパゴス化する）リスクが高い．QSTをはじめ国内研究者・メーカーが長年蓄積してきた貴重な技術と人材力を将来の市場で確実に活かし勝利させるためにも，海外の急速な開発スピードとの時間差を回避する柔軟な戦略的転換が不可欠である．

HTSは高磁場化と伝導冷却を可能にし，コンパクト炉の高出力密度（B^4）と低コスト化を同時に実現する．これにより，商業炉としてのコスト競争力とエネルギー安全保障が確保される．

④「素材先進国・日本」としての攻めの研究開発とマグネットの信頼性実証

「HTS技術はまだシステムとして確立されていないから時期尚早だ」という慎重論は，研究開発の本質とグローバルなサプライチェーンの現実を見落としている．

- 日本の線材が世界を動かしている事実：
  米英の最先端コンパクト炉の心臓部（高磁場マグネット）を支えているのは，他ならぬ日本企業（フジクラ等）が製造する世界最高峰のREBCO超伝導線材である．
- 無絶縁（NI）構造とクエンチ保護物理の進展：
  技術的課題とされるクエンチ保護に関しても，米CFS社等のSPARC向けモデルコイル試験（TFMC）において，「無絶縁・撚り無し（NINT）」構造の採用

により，20 K 20 Tという極限環境下での40 kAの通電に成功している．100 MJを超える大規模NIコイル特有のクエンチ特性が実測データとシミュレーションによって解明されており，局所焼損を防ぐ高度な能動的クエンチ保護制御がすでに実機仕様として確立されつつあり，工学的信頼性を強固にしている．

- チャレンジ精神の回復：
  世界がHTS線材を用いて次世代炉の標準化を進める中，日本が「未確立」を理由にLTS大型炉へ固執することは国際競争力の観点から不利を招く．未確立の技術リスクを自らの手で開発し，「ものにする」ことが期待される研究開発の方向性である．

⑤希少資源ヘリウムからの解放とエネルギーセキュリティ

核融合炉を一過性の実験装置ではなく，将来的に社会を支える「基幹電源（100台，1000台規模の展開）」として定着させるためには，燃料だけでなく「冷却媒体」の資源制約を解決しなければならない．

- LTS巨大炉の脆弱性：
  4.5 Kへの冷却に大量の液体ヘリウムを必要とする低温超伝導（LTS）炉は，ヘリウムの産出国偏在や価格高騰，地政学的紛争による供給途絶リスクに直結しており，ベースロード電源としての重大な供給リスクを内包する．
- HTSによる伝導冷却運転と将来の展望：
  動作温度を10〜20 K領域まで引き上げられる高温超伝導（HTS）は，大量の液体ヘリウムを炉心全体に浸漬・循環させる大規模なLTS用冷却インフラを不要とし，閉サイクル冷凍機による効率的な「伝導冷却」や少量のガス冷媒循環を可能にする（中国HH70でも全HTSコイルの閉サイクル強制循環冷却が実証済）．もちろん，極限的な高磁場発生に伴う巨大な電磁応力を支持するため，臨界電流特性を最大限に引き出す目的で10 K前後まで冷却する設計選択肢も存在するが，極低温高強度構造材料の開発・適用が進めばこの冷却要請は緩和され，20 K領域での伝導冷却運用の適用範囲はさらに拡大する．これによりヘリウム保有量を桁違いに削減できるだけでなく，将来的な完全ヘリウムフリー化への選択肢も広がり，我が国のエネルギーセキュリティを担保する上で極めて重要なマイルストーンとなりうる．

⑥電力単価（発電コスト）におけるコスト競争力と保守工学の最大化

核融合発電がビジネスとして成立し，既存の系統電源に組み込まれるためには，他のエネルギー源と同等以下の「電力単価（LCOE）」を実現するコスト競争力が大前提となる．

- 大型LTS炉の電力単価高騰リスク：
  初期の建設に約2兆円を要するQ-DEMOクラスの巨大炉は，その巨額の固定費と長期間の建設期間と保全ダウンタイムがそのまま電力単価（円/kWh）の跳ね上がりに直結する．
- コンパクト炉による電力単価の劇的抑制とモジュール運用：ホットセル共有による保守効率の最大化：
  コンパクト炉を同一敷地内に複数基配置する「マルチモジュール運用」とすれば，1基あたりの資本リスクを抑制して給電を安定化できるだけでなく，各基のメンテナンス時期（保全サイクル）を計画的に分散させることが可能となる．これにより，ホットセル（放射性物質取扱室）等の極めて高額で希少な炉内保全・遠隔保守インフラを，最小限の設備数で常時効率的に使い回す（共有化する）ことができるため，プラント全体の投資効率と稼働率を最大化できる．

⑦ダイバータや第一壁の高熱負荷の課題の先取りと効率的研究開発

ダイバータはDEMOの中で最も厳しい熱負荷環境に置かれる．日本のDEMO設計では，定常熱負荷10 MW/m^{2}超に対し，タングステンの熱衝撃，照射脆化，冷却構造の最適化，交換頻度の増大などが主要課題として整理されている．上田[8]，朝倉[9]，鈴木[10, 11]は，ダイバータの熱設計・構造・材料課題を体系的に評価した．これらの知見を踏まえると，巨大炉では極めて高い熱負荷や材料損傷により交換頻度が増大し，結果としてダイバータ交換や過酷熱負荷対策が保守性の制約要因となる．

高磁場，コンパクト化を追求する設計では，プラズマの閉じ込め性能を高めて出力密度を飛躍的に向上させる反面，巨大炉と比較してダイバータや第一壁への局部的な熱負荷がさらに増大（極高熱負荷化）する可能性がある．しかし，この過酷な熱流束への対処は，将来の商用フュージョン発電システムが市場で成立するために「必ず直面し，克服しなければならない共通の技術的障壁」である．

- 課題の先取りと実機検証プラットフォーム化：
  この最難関課題を，あらかじめ初期投資を抑えたコンパクト炉の段階で「先取り」して直面することは，研究開発戦略上極めて合理的である．大型炉のように1回あたりの改造に数年を要する重厚な設備では，熱負荷によるコンポーネントの損傷や設計変更のリスクが致命的な停滞を招く．
- 革新概念の高速イテレーション：
  これに対し，炉の規模がコンパクトであれば，その高い機動性を最大限に活用し，先進的なダイバータ概念や革新的な第一壁冷却方式などの工学的アプローチを実機環境下で迅速に試験・交換し，最適解を導き出すための圧倒的に効率的なR&Dサイクルを確立できる．

⑧日本＋EU共同のDEMO設計（BA Phase I）と可用性

日本（QST）とEU（EUROfusion）は，BA Phase-IDEMO設計活動[12–14]で，ブランケット交換方式，ダイバータ設計，材料損傷，保守性を共同評価した．これらの評価結果を踏まえると，大型炉では交換性と保守性がプラントの可用性に直結することが明確になる．

⑨HTS（高温超伝導）採用における技術的エビデンスと実用性

近年，ReBCO（希土類系銅酸化物）に代表される第二世代HTS線材では，製造技術および大電流導体化技術が

急速に進展し，20 T級を超える強磁場発生実証や大口径マグネットへの適用性が世界的に報告されている[15, 16]．

HTSは液体ヘリウム温度（4.2 K）近傍のみならず，20～30 Kの温度域でも高い臨界電流密度（J_c）と上部臨界磁場（B_{c2}）を維持することが示されている[17]．この広い温度マージンにより，核融合炉のダイバータや真空容器近傍における高熱負荷・核加熱に対してコイル側の熱的余裕が増大し，冷却システムの簡素化と運転安定性の向上が可能となる．

米国のSPARC（主半径R＝1.84 m）は2027年頃に初プラズマを予定し，Q-DEMOの約1/3の寸法，約1/40の体積という極めてコンパクトな設計で純発電領域（Q≥10）をめざす[18]．

ARC（R＝3.3 m）は商業炉としてのコスト競争力を前提に設計されており，開発企業のロードマップでは2030年代前半の送電開始が想定されている[19]．英国のSTEP（R＝3.6 m）は，正味電力100 MW以上の送電とトリチウム自給を掲げ，商業炉としての採算性を最優先に設計されている．中国Energy Singularity社は，世界初の全HTSマグネットを統合したトカマクHH70（R＝0.7－0.75 m）をわずか2年で建設し，中心磁場1 T，最大持続時間1337 sの初プラズマ運転に成功した[20]．これはTF，CS，PFの多数のHTSコイルを実機として統合し，安定運転を達成した世界初の成果である．同社は次期装置HH170（R = 1.5 m，中心磁場10 T）でQ＞2をめざしている．

プラズマ・核融合分野における国内のHTS応用としては，東京大学のMini-RTおよびRT-1装置において世界初となる磁気浮上型内部導体へのHTSコイルの実用化が挙げられる[21-23]．さらに，核融合科学研究所（NIFS）と東北大学を中心とするSTARS導体などの開発により，100 kA級の超大電流HTS導体の通電実証がなされるなど，大型マグネットシステムへの適用に向けた基盤技術の蓄積が進んでいる[15]．

国内でも極めて重要な設計アップデートが行われた．民間主導で開発が進むFAST装置[24]について，従来のQ≈2程度の仕様から，世界標準の高磁場コンパクト炉と整合する新設計が公式に発表された．2026年7月の報道によれば，FASTは主半径を約4 mに大型化し，核融合出力を最大200 MW，発電出力を最大76 MWとする新設計を発表し，Q = 2とQ = 10の二つの運転モードを想定する段階的アプローチを採用している．

3．社会実装に向けた事業・開発体制の段階的移行

核融合炉を社会実装へと結びつけるためには，炉の規模や技術仕様の最適化だけでなく，それを推進する事業体制の構築が不可欠である．巨大炉路線では，公的研究機関が設計・建設・運転・保守を一括して担う従来モデル（**図1**）が成立しない．長期建設・巨額投資・保守の複雑化により，国費依存と責任集中が構造的な制約となるためである．この課題を解決するため，本研究では「従来モデル→実証段階モデル→商業段階モデル」という三段階の体制移行を提案する．

①従来モデル（図1）の限界：国家プロジェクト型の構造的制約

- QSTが設計・発注・運転を一括して担う体制
- 巨大炉では，長期建設・巨額投資・保守負荷が集中し，国費依存が不可避
- 商業炉としての持続的運用には適さない

②実証段階モデル（図2）への移行：官民融合・SPC主導の高速開発体制

- SPC（特別目的会社）が事業主体となり，意思決定と資金調達を高速化
- QST，重工メーカー，電力会社から高度人材を集約
- 実機運転のノウハウを電力会社へ段階的に移転
- 商業化に必要な「技術・運転・保守」の実践知を蓄積するフェーズ

③商業段階モデル（図3）：電力会社主導の基幹電源体制

- 電力会社がOwner/Operatorとして発電事業を担う
- スタートアップはシステムインテグレーターとして標準化プラントを供給
- 民間サプライチェーンが成熟し，量産・保守・運用が産業として確立

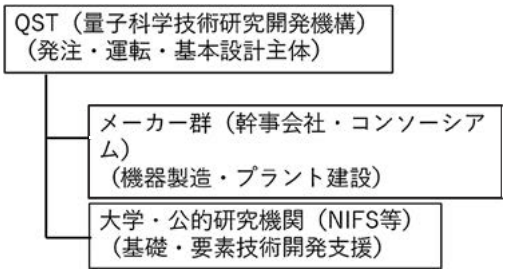


図1　従来の開発体制（国家プロジェクト型）．

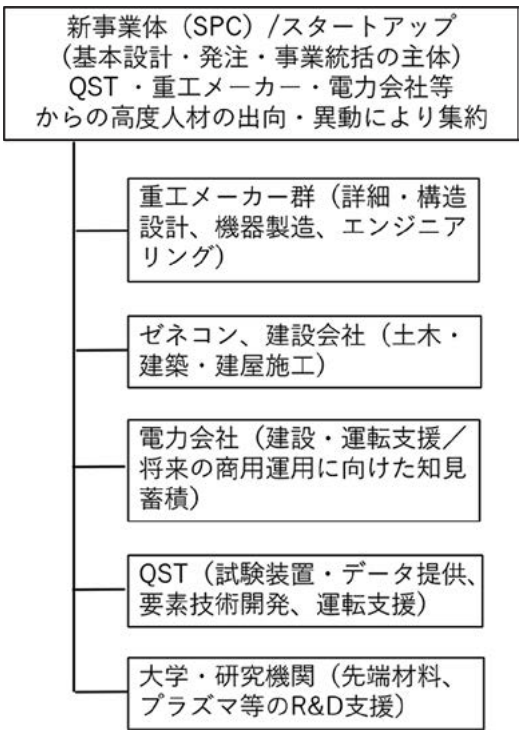


図2　発電実証炉段階の体制（官民融合・スタートアップ主導型）．

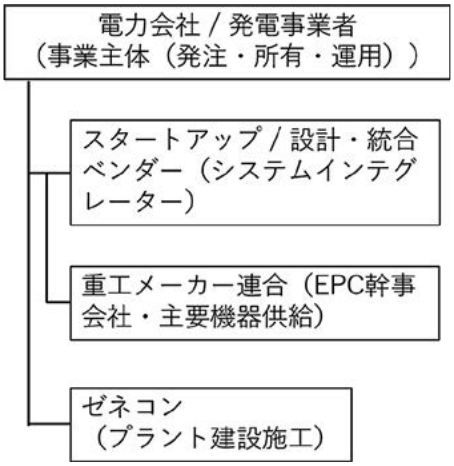


図 3　商用化段階の体制（電力会社・インダストリー主導型）.

• 原子力・火力と同様の「電力事業モデル」へ移行

この三段階モデルにより，QSTが蓄積した世界最高峰の知見を損なうことなく，官民の技術資源を統合し，巨大炉路線では成立しない商業炉の社会実装を現実的な体制で達成できる.

4．総括

以上の分析から，炉規模のコンパクト化は単なるコスト削減の議論にとどまらない．それは，「保全の容易さによる高い稼働率の確保」「実機を用いた工学的PDCAを回す機動性」「次世代への確実な技術伝承」「ヘリウム資源リスクを低減するエネルギー安全保障」，そして「高熱負荷課題の早期克服と高額保全インフラの共有化によるコスト競争力の強化」を同時に追求する上で，極めて有望かつ現実的な工学的・戦略的選択肢になり得ると考えられる.

巨大炉開発が直面する構造的課題（交換性，稼働率，長期工期，初期投資，資源制約）は，核融合エネルギーの早期社会実装をめざす上で避けて通れない論点である．これに対し，最新のHTS技術を基盤とするコンパクト炉は，保守性，稼働率，技術伝承，経済性，エネルギー安全保障の諸要件を高い次元でバランスさせ得る有力なアプローチの一つである．トカマク型にとどまらず，ヘリカル型や慣性核融合など多様な炉形式・閉じ込め概念を開拓してきた我が国の幅広い基盤技術を活かす上でも，機動性の高い実機プラットフォームの存在は全体の技術成熟度を底上げする契機となり得る.

QSTをはじめとする研究機関が数十年にわたり蓄積してきた世界最高峰の知見と，国内メーカーが誇る優れたEPC能力は，我が国の核融合開発における確固たる「生命線」である．今求められるのは，現行の枠組みで培われた実績，知見，そして優秀な人材の力を，民間の機動力を活かした官民融合の枠組み（新事業体/SPC）へ柔軟に展開し，国内外の動向とも連動した高磁場コンパクト炉（FASTの新設計等）の開発・実証を加速させる戦略的検討である.

特に重要なのは，事業体（Owner/Operator）の受皿を段階的に発展させるマネジメントの視点である．公的研究機関が一括して事業・建設を担う従来モデル（**図 1**）から，実証段階ではQST，重工メーカー，電力会社から高度人材を結集させた新事業体（**図 2**）が牽引し，最終的には電力会社を軸とした商用事業体制（**図 3**）へと滑らかに移行させる構造を提示することが，社会実装に向けた最大の鍵となる.

ここで改めて強調すべきは，基幹電源をめざすフュージョンエネルギーの開発を，単なる市場論理や過度な期待のみに委ねるのではなく，確固とした技術的・工学的裏付けのもと，国家戦略として着実に支援・育成していくべきだという点である．このような「官民の技術資源を統合した段階的開発体制」の構築こそが，2030年代以降の国際商業競争において我が国の核融合技術を真の実効的成果へと導く重要な羅針盤になると確信する.

参 考 文 献

［1］原子力委員会核融合専門部会報告書「今後の核融合研究開発の推進方策について」(2005年).
［2］内閣府，「Q DEMOの概念設計（概要）第6回社会実装検討タスクフォース資料2　2」(2026).
［3］K. Tobita *et al.*, Fusion Sci. Technol. **75**, 372 (2019).
［4］K. Tobita *et al.*, J. Phys. Conf. Series **1293**, 012078 (2019).
［5］K. Tobita *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 1024 (2018).
［6］H. Utoh *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 1409 (2012).
［7］鈴木 哲 他：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 768 (2006).
［8］上田良夫 他：プラズマ・核融合学会誌 **92**, 868 (2016).
［9］N. Asakura *et al.*, Nucl. Mater. Energy **35**, 101446 (2023).
[10] 鈴木 哲 他：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 699 (2006).
[11] 鈴木 哲 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 607 (2011).
[12] BA Phase I DEMO Design Activity Final Report, QST & EUROfusion (2017).
[13] G. Federici *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 729 (2018).
[14] G. Federici *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 066013 (2019).
[15] 柳 長門，西村 新：低温工学（低温工学・超電導学会誌）**60**, 189 (2025).
[16] 柳 長門：プラズマ・核融合学会誌 **100**, 467 (2024).
[17] Z.S. Hartwig *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **33**, 11LT01 (2020).
[18] A.J. Creely *et al.*, J. Plasma Phys. **86**, 865860502 (2020).
[19] B.N. Sorbom *et al.*, Fusion Eng. Des. **100**, 378 (2015).
[20] Z.Y. Li *et al.*, Superconductivity **12**, 100137 (2024).
[21] Y. Ogawa *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **79**, 643 (2003).
[22] Z. Yoshida *et al.*, Plasma Fusion Res. **1**, 8 (2006).
[23] Y. Ogawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 1405014 (2014).
[24] https://sle.energy/fast-project/