

S2-2

シンポジウム：先進核融合炉における材料・炉工学研究 (2) 先進核融合炉開発の現状と、炉壁における物理環境

Present Status of Advanced Fusion Reactor Development and Physical Environment of Plasma Facing Wall

小西哲之

Satoshi Konishi

京都フュージョニアリング

Kyoto Fusioneering Ltd.

1. はじめに

ここ数年来明らかになってきた、プライベートを中心とする世界の新しい核融合開発の流れは、今や公的機関・大学、学会などでも無視できない大きな潮流として、核融合研究者コミュニティにも認識されるようになった。従来のITERから原型炉、という流れは公式の計画としては健在ではあり、その学術的な基盤にも変わりはない。しかしITER計画の遅延もあり、TBM照射試験は2040年代、原型炉はさらにその先、というスケジュールに対して、今や多くの核融合装置が技術的困難と実現性はともかくとして、早ければ2020年代から、何らかのDT核燃焼を目指した活動を開始している。当然、それらの装置では何らかの核融合材料が使用され、プラズマや高速中性子、過酷な炉内環境にさらされることになる。それは装置の性能や成立性を左右するし、核融合開発の方向性さえ変える。この状況において、核融合炉工学、炉材料はどう対処すればよいのだろうか？少なくとも「先進」「代替」「革新的」と言われる材料や工学を視野に入れ、あるいは主な研究テーマとする研究者には重要な課題のはずである。本シンポジウムにおいて、この講演は特にこの新しい潮流とその意味するところを考える。

2. 核融合開発の新しい流れ

いわゆる核融合ベンチャーの最近の躍進は目覚ましく、民間から集めた資金は公的計画より一桁多い。この大部分は新たな装置の研究開発に使われているのであり、当然核融合の最新の概念や装置は、もっぱら民間主導により設計製作されていることになる。この動きを主導しているのは米国、英国中心のスタートアップ企業であり、より長期の計画で技術的な確度の高

い選択をするITERや、日欧中韓などの公的原型炉計画とはかなり技術の性格が異なる。これらは総じて、

- ・より早期の核融合実現を目指し、
- ・より先進的な概念と最新の技術を選好し、
- ・より小型・高性能を目指し、
- ・より短周期の開発サイクルをとり、そして
- ・より高い技術リスクを許容する。

民間資金中心であるのでROI:Return of Investmentの観点からは必須であり、当然核融合エネルギーの商業利用が最優先課題であり、また市場競争、産業化とサプライチェーンの構築が念頭にある。ここに国家の政策としての自国産業育成と、技術セキュリティの確保の観点加わり、国家が支援して民間を競わせる構図が発生している。その結果として、核融合エネルギー商業化のはるか以前である、ここから10~15年程度の新規な核融合装置の開発製造競争が、そのまま初期の核融合市場シェアに決定的であると認識されている。

すでに多数社起業の草創期を終え、核融合企業は大型化と合従連衡の時代に突入している。これは、少なくとも100億~1000億円相当、100名規模の専門人材を必要とする核融合開発では必然であり、民間核融合開発全体の資金総額と規模は拡大を続ける一方、炉概念が設計、製作、試験を進めるうえでやがて集約されることは避けられない。その中でも大型の装置開発フェーズに突入した計画には共通の特徴がある。

3. 次世代核融合開発の特徴と材料工学課題

表1に、現在公表されている核融合開発計画を示す。(当社によるまとめ。民間で情報が明らかでない、明確に炉開発を志向していない、順不同、など留意されたい。米国DOEの

milestone program の8社と、半官のUKAEAは入っている。) これらの特徴は一言で言えば、「先進志向」とダイバーシティであり、「選択と集中」とは逆方向と言える。

厳密には動力炉概念と言えるレベルの設計は実は一つもないが、これはすべて、次世代の装置の実験によりそのフィジビリティを確認して初めて工学的設計が可能になるためと言える。技術的予測可能性の高いITER-原型炉路線とは異なり、様々なプラズマ概念が並ぶ。ブランケット概念はほぼすべてが液体増殖であり、水冷却はない。発電方式はほとんど不明であるが、動作温度が総じて高いので鉄鋼系のRAFMやオーステナイトは二次系でもあまり考えられていない。

要するに物理主導で炉概念を構築しようとすると材料には困難な領域が発生し、また現存の材料から想定すると物理設計が成立しない可能性がある。炉内機器材料としては、タングステン、バナジウム、SiC複合材が候補にはなりうるが、照射耐性、化学的両立性、強度や寿命などがまだ評価されているとはいいいがたく、設計ウィンドウを定量的にパラメータ空間で定義できる段階にないのである。

4. 炉壁の物理環境と今後の方向性

炉概念は特にプラズマに直面する炉内機器には密接に関係するはずであるが、少なくともブランケットの材料を明確に示したものはほとんどない。小型化高性能化のためプラズマ対向壁の受けるエネルギー密度は高く、多くが液体壁の採用を考えている。対向壁は中性子負荷、

粒子負荷、フォトン、電磁場にITER等より厳しい条件で晒されるが、慣性系のいくつかの概念ではスパッタリング以外にもデブリやさまざまな物理的負荷がありうる。さらにブランケットが高温になれば温度領域や化学環境、プラズマとの直接接触も考慮する必要がある。

このような状況において、材料・工学研究が考慮しなければならない課題が少なくとも3点ある。

① エネルギープラントの成立性が最終的に材料と工学性能の限界に依存する可能性が高く、逆に材料・工学の観点から早期にこれら新概念の研究開発活動に関与し、物理と情報交換をしながら設計開発を進める必要がある。

②使用可能な材料の候補、新材料への要求に対して照射や物理環境での実験研究機会や施設が現存しない。現在の材料照射試験及び計画はRAFM中心かつ原型炉対象であり、これら新たな概念や装置開発計画、その候補材料や照射条件、物理環境はほとんど考慮されていない。

③これら先進概念は2020年代からのDT反応試験を計画しており、新たな材料とそれを用いた運転は必然的にトリチウムの取り扱いと、最終的にはその安全、環境社会影響に大きな影響を及ぼす。一方それら施設の安全、許認可に材料・工学の知見は早期から必要とされる。

これらの状況を考えたとき、現在起きている新たな核融合研究開発の流れにおいて、材料・工学系の研究に期待される役割の重要性と緊急性は明らかである。現在の研究の方向性の見直しの必要性必然性、新たな展開の可能性もまた理解できるであろう。

Company	Location	Funds raised	Type of reactor	Fuel cycle	Power plant concept	blanket	temp (°C)
Commonwealth Fusion Systems	MA, USA	\$ 2,000M	Tokamak	D-T	ARC reactor	FLiBe	630°C
Tokamak Energy	Oxford, UK	\$ 250M	Spherical tokamak	D-T	ST-E1	Li/Agnostic	~600°C
Focused Energy	USA / Germany	\$ 82M	ICF (direct drive)	D-T	SuperNova	Li/Agnostic	-
Realta Fusion	WI, USA	\$ 12M	mirror	D-T	HAMMIR	Agnostic	-
Xcimer Energy	CA, USA	\$ 12M	ICF	D-T	HYLIFE-III	FLiBe/Agnostic	-
ZaP Energy	WA, USA	\$ 208M	Z-pinch	D-T		LiPb	-
Type One Energy	WI, USA	\$ 30M	Stellarator	D-T		-	-
Helion Energy	WA, USA	\$ 577M	FRC	D-He3	Polaris	-	-
General Fusion	BC, Canada	\$ 300M	Acoustic implosion	D-T	Yes?	LiPb	-
UKAEA STEP	UK	\$ 222M	Tokamak	D-T	STEP	Li/Agnostic	550-600°C
Kyoto Fusioneering	Japan,UK,US	\$ 90M	not specified	D-T	Yes?	LiPb,Li,FLiBe	500-1000°C

表 1 現在民間中心に計画される核融合開発

