

フュージョンエネルギーの産業化に挑むスタートアップ — 京都フュージョニアリングのプラント技術と統合実証 —



企業レポート

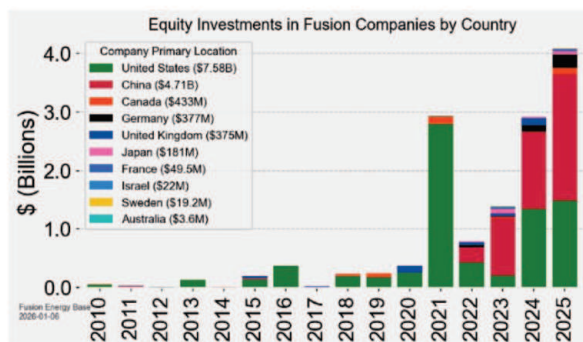
松 永 祥 尚*

A Startup Challenging the Industrialization of Fusion Energy:
Plant Technology and Integrated Demonstration by Kyoto Fusioneering
Key Words: Fusion energy, Fuel cycle, Blanket, Thermal cycle, UNITY

1. はじめに

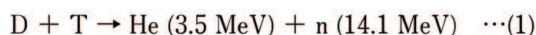
フュージョン(核融合)エネルギーは、水素同位体のような軽い原子核同士が融合してより重い原子核へと変わる反応であり、太陽が光り輝くエネルギー源でもある。その研究は1950年代から続けられ、1)燃料資源が豊富、2)発電時に温室効果ガスを排出しない、3)高レベル放射性廃棄物を発生させないという優れた特徴をもつ。日本はITERへの機器供給を通じて重要な役割を果たしてきたが、実用化は長らく「常に30年後」と擲言されてきた。しかし近年、脱炭素に向けた世界的潮流の中で状況は一変し、米国を中心に毎年数千億円規模の資金が流入して(図1)、多数のフュージョンスタートアップが誕生している。保守的になりがちな公的プログラムに対し、スタートアップはリスクを取って先進的な挑戦を行いやすい。

京都フュージョニアリング(以下、KF社)は、こうした潮流の中で商業炉の早期実現に貢献すべく、2019年に京都大学発のスタートアップとして設立された。多くの企業がプラズマでの核融合反応そのものを研究対象とするのに対し、KF社はそれらを支え、発生したエネルギーを電力や熱といった「商品」へ変換する炉工学・プラント技術に強みを持つ稀有な企業である。本稿では、フュージョンプラントの全体像とKF社の取り組みを概観する。

図1: 国別の核融合企業への株式投資¹⁾

2. フュージョンエネルギープラント

フュージョン反応は、代表的には重水素(D)と三重水素(トリチウム:T)の原子核の結合で起こる発熱反応であり、式(1)で表される。DとTが衝突してヘリウム原子核と中性子が生成し、総エネルギー17.6 MeVが放出される。燃料1グラムから得られるエネルギーは石油約8トン分に相当する。



この反応を起こすには約1億5000万度の高温プラズマ状態が必要である。プラズマの反応を制御し、エネルギーを輸送・変換して商業利用可能にするのがフュージョンエネルギープラントである。図2に示すように、プラントは大きく5つのセクション、すなわち①中性子をブランケットでリチウムに照射してトリチウムを製造・回収し熱を得る一次冷却系、②熱を発電や水素製造に利用する二次冷却系、③燃料ガスを回収・精製してプラズマへ供給する燃料循環系、④空気や水からトリチウムを除去する安全系、⑤炉心プラズマおよびプラズマ加熱系から構成される。①②はまとめて熱サイクルシステム、③④は燃料サイクルシステムと呼ばれる。

中性子エネルギーの回収を担う一次冷却媒体には、



* Yoshinao MATSUNAGA

1988年4月生まれ
大阪大学大学院 基礎工学研究科 (2013年)
現在、京都フュージョニアリング株式会社
(Plant Technology Group Fuel & Thermal Cycle Technologies Department)
TEL: 070-4030-3025
E-mail: y.matsunaga@kyotofusioneering.com

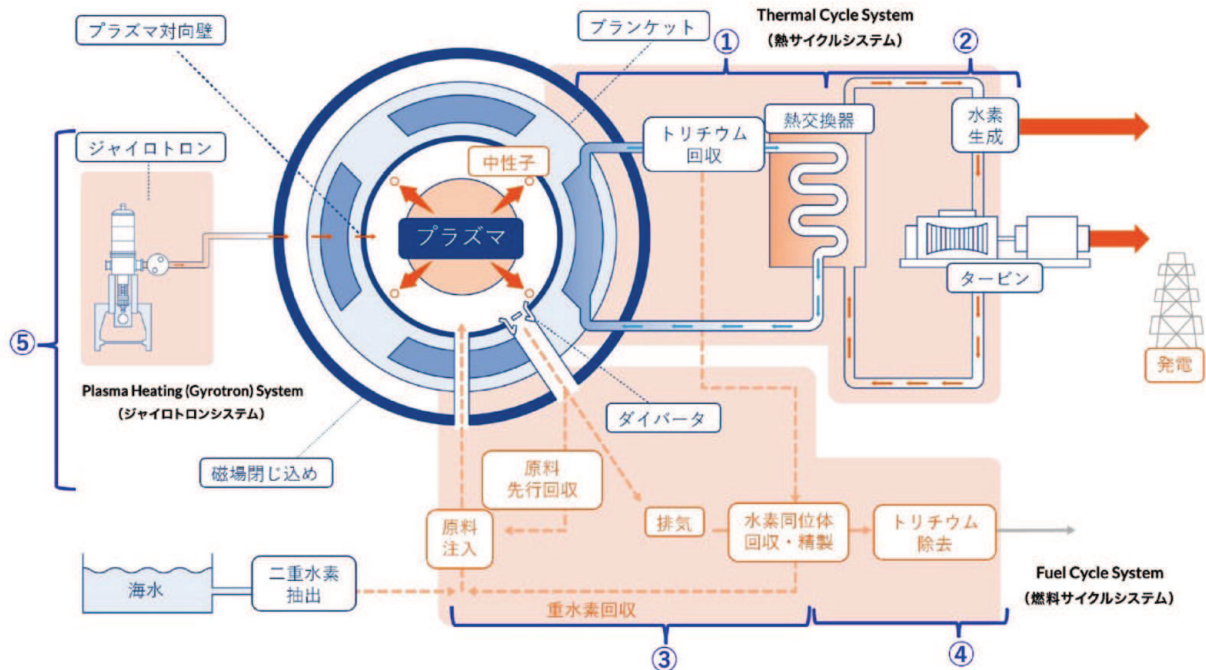
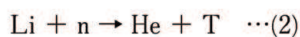


図2：プラントの概略構成

I) 取り扱いが容易なヘリウムガス、II) 実績の多い水、III) トリチウム増殖と冷却を兼ねる液体金属・溶融塩などの液体増殖材がある。近年のスタートアップ主導の開発では、課題は多いものの高性能が望めるII)の液体ブランケットが最有力となっている。ブランケットで生成したトリチウム式(2)はトリチウム抽出システムによって回収される。



ブランケットで加熱された一次冷却媒体は、熱交換器で二次冷却媒体を加熱し、再びブランケットへ戻る。冷却媒体の選択により300～1000℃の温度が得られ、発電なら効率の高いブレイトンサイクルが商業炉の目標となる。プロセス熱をバイオマスの熱分解反応などに供給する道もあり、生成ガスから得られる水素やFT (Fischer-Tropsch) 合成燃料はカーボンニュートラルな燃料となる。このようにフュージョンプラントは、マスバランス・ヒートバランス・反応工学・分離抽出といった化学工学と密接に関わる装置群である。

3. 京都フュージョンリアリングの取り組み

フュージョンプラントは化学プラントと近い技術

基盤を持つ一方で、腐食性の高い液体増殖材や放射性物質であるトリチウムの取り扱いを含むため、材料・安全設計に固有の課題を解決する必要がある。基礎工学は長年研究されてきたが、工業化技術の成熟度は依然として低く、工学規模での実証が急務である。

そこでKF社は、フュージョンプラントを模擬した統合実証施設UNITY (UNIQUE Integrated Testing facility) を展開している。日本の京都(久御山)に建設したUNITY-1はブランケット・熱サイクルシステムに特化した施設で、実際の核融合反応を起こさずに一次・二次冷却系の熱サイクルを実証する。一次冷却媒体には、トリチウム増殖と冷却を兼ねる液体リチウム鉛合金($\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$)を採用する。 LiPb は化学活性が比較的低く常圧で1000℃まで使用できるが、500℃以上では汎用金属材料への腐食性が高いため、高温部にはSiC繊維強化SiCセラミック複合材料(SiCf/SiC)やモリブデン等を用いる。

SiCf/SiC はケイ素と炭素という、中性子照射を受けても短半減期核種にしか変わらない軽元素で構成されるため誘導放射化度が低く、さらに中性子照射環境下での高温強度・寸法安定性に優れ、金属構造材よりも高い温度で運用できる。こうした特性から、 SiCf/SiC はブランケットの構造材料として、

廃棄物管理・保守における安全性とプラント性能を両立できる有力な候補材料となっている。UNITY-1では、SiCf/SiC製ブランケットへLiPbを供給して熱回収を模擬するとともに、4テスラまでの強磁場下での流動試験、Vacuum Sieve Trayを用いたLiPbに溶解した重水素の抽出試験、LiPbから熱を取り出し発電試験を統合的に実施する。UNITY-1は2024年に着工し、2025年から各種実証試験を取り進めている。

さらにKF社は、カナダ原子力研究所(CNL)との合弁会社Fusion Fuel Cycles(FFC)を通じて、燃料サイクルの実証施設UNITY-2をカナダ・オンタリオ州チョークリバーに建設している。UNITY-2は、燃料の注入・排気、不純物除去、水素同位体分離、トリチウム貯蔵といった燃料サイクル要素技術を統合的に実証する世界初の施設であり、最大30グラムのトリチウムを24時間サイクルで循環させる能力を持ち、将来的には最大100グラムまでの取り扱いに対応できる設計となっている。現在主要機器の調達、建設を開始しており、2026年後半の試運転開始を目指す。加えて米国オークリッジ国立研究所(ORNL)と連携し、増殖ブランケット試験施設UNITY-3の共同開発にも着手した。KF社はこのほか、プラズマ加熱用ジャイロトロシステムを世界の主要なフュージョン炉心実験施設へ供給している(図2-⑤)。UNITY-1~3で実証する各要素技術、主要システム群は、図2に示すプラント構成の各セクションに対応しており、KF社はこれらを基盤とし

て、2025年4月に設立されたStarlight Engine(SLE)が推進主体となって取り進めている発電実証プロジェクトFAST(Fusion by Advanced Superconducting Tokamak)にも、UNITYプログラムで培った要素技術を提供する主要パートナーとして参画する。

4. おわりに

フュージョンエネルギーは商業炉の実現にはまだ至っていないものの、公的国際プログラムに加えスタートアップによる開発の加速により、プラズマ反応だけでなくプラント技術の開発も着実に進みつつある。わが国のモノづくり技術はこの分野でも大きな強みを持ち、新たなビジネスチャンスが広がっている。KF社は、熱・燃料・材料を横断する統合エンジニアリングを軸に、UNITYプログラムを日本・カナダ・米国へと展開し、フュージョンエネルギーの早期実用化とサプライチェーン構築に貢献しようとしている。原子力・機械工学・化学工学・熱工学等の工学、エンジニアリングこそがフュージョンプラント技術の基盤であり、学術・産業の両面から一層の参画が望まれる。

参考文献

- *1 : Full Year 2025 Fusion Equity Financing Update, Fusion Energy Base
(<https://www.fusionenergybase.com/articles/full-year-2025-fusion-equity-financing-update>)

