

## 産業界の技術動向

# 京大発スタートアップの核融合への挑戦

京都フュージョニアリング

小西 哲之

## 1. 今なぜ核融合スタートアップなのか

2023年4月14日、内閣府から「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が発表され、わが国が新たな低炭素エネルギー技術としてのフュージョンの開発を推進し、かつその産業化を次世代のエネルギー産業として育成する方針が示されました。この背景には、近年のGX（グリーントランスフォーメーション）に向けた世界の政治、産業界、経済界の大きな潮流があり、また米国英国を中心とした「核融合ベンチャー」の勃興が大きく影響しています。ここでこれまで公的計画のみであったわが国の核融合開発政策を大きく転換させた要因の一つが、実は京都大学発、2019年設立の「京都フュージョニアリング（株）」なのです。京都大学は、そもそも湯川博士が1957年原子力委員会核融合反応懇談会の会長を務めたことなど、わが国核融合研究の草創期から主導的な役割を担ってきましたが、60年を経て再び新たな流れの源流となったといえるかもしれません。

公的計画としての核融合は、国際熱核融合実験炉ITERの国際共同事業、あるいは日欧協力によるJT60SA装置や核融合研における大学共同利用施設LHDなど、大型装置が中心です。これらは着実な成果を上げ、技術的実現性が高い確度で期待されながらも、その実用化は今世紀半ば、とみられていました。ところが世界のスタートアップは、高温超電導など最新の技術を用い、ずっと小型の装置で、2030年代にも発電実証や商業化を目論んでいます。気がつけば公的な大型計画は、予算や人員の制約、「失敗できない」という圧力でリスクを避けて保守的な技術オプションを志向していますし、ITERなどは2000年代初頭にすでに設計が固定されていて最新のイノベーションは使われにくいのです。これに対し「ベンチャー」企業は最新技術でイノベーションを狙い、しかもリスクを取って先進的な挑戦を行う傾向があります。失敗する確率も多いでしょうが、成功したものが社会に残ります。今世紀に入ってより一層加速した先進国の技術開発において、イノベーションの主体は大企業や公的機関でなく、今やスタートアップ企業に移っているのです。夢のエネルギーといわれて久しいフュージョンエネルギーも、その例外ではなく、画期的な技術革新や早期実現には新たな企業が必要とみられています。

図1に米国における核融合研究資金の、公的予算とプライベートの投資の比較を示します。それまで数百億円規模で安定的に供給されてきた公的予算を、ここ3年くらいは民間投資が凌駕していることがわかります。これらの資金は、核融合研究設備の製造建設と研究開発人材に投じられています。これは核融合装置の市場はすでに1000億円規模で成立していて、現在これらを供給できる企業がすでに市場シェアをつかみつつあること、また技術力を持つ人材もまた圧倒的にこれらの企業が雇用している、ということです。核融合は数10年後の夢ではなく、すでに十分大きな市場として現存しています。そして、米国の宇宙開発の主力がSpaceXに代表されるような民間に移ったと同じように、核融合実用化の主役としてのスタートアップの競争がはじまっているのです。

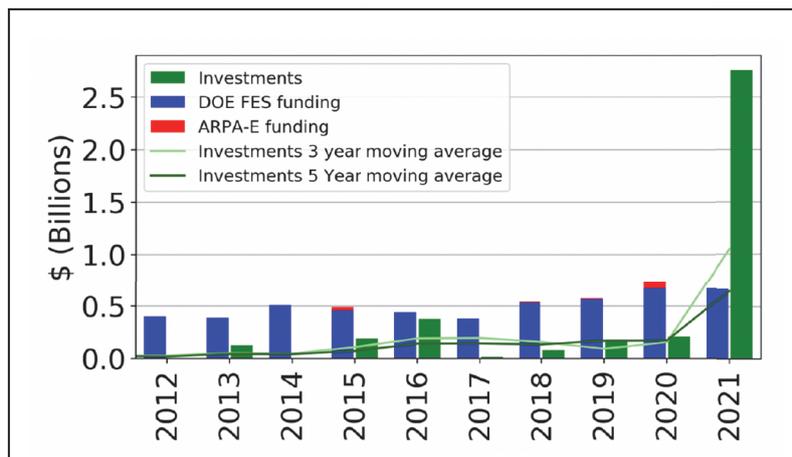


図 1. 米国における近年設立された核融合スタートアップの研究資金と公的資金の比較

## 2. 京大発ベンチャーとしての役割と狙い

この新たな技術革新の流れの中で、大学発ベンチャーというメカニズム、つまり独創的なアイデアと小規模で小回りの利く大学の研究開発を社会実装につなげる、というスタイルは、大学の果たすべき社会的な機能のひとつとして今や必須といえます。わが国や京大は世界レベルでは残念ながらその先端ではないながらも、遅れてはなりません。大学は、技術シーズとしては宝の山ではあるものの、資金集めや実社会のビジネスでのつながりにおいて特に疎いことがあり、起業には精神的バリアも含めて困難を伴います。京都大学は京大イノベーションキャピタル、という投資会社を擁し、また学内の起業を志す研究者などに助言やネットワークの紹介などのサポートを行っていて、筆者にとっても京都フュージョニアリング社の成立の大きな要因となりました。

京大は核融合研究開発では老舗ではあるのですが、京都フュージョニアリング社は、エネルギー理工学研究所、エネルギー科学研究科、という学際的で工学志向の分野の研究の社会実装を狙って2019年10月に設立されました。筆者の専門領域は核融合研究の中でも特に炉工学と呼ばれる核融合装置の工学であり、核融合反応の結果生じる高速中性子のエネルギーを安全に使える形に変換し、また総合的に社会や環境に適合するシステムとして構築することです。一方、京大内の学際研究組織「生存基盤科学研究ユニット」として、人類の持続可能な生存を支えるエネルギー、環境、経済システムの研究に取り組んできました。核融合という技術体系と、スタートアップ起業におけるビジネスモデル構築、という意味では、革新的な核融合技術を開発し、それを供給する、というエンジニアリングサービスを提供するBtoBが主な業務になります。公的機関では国などの予算によって核融合実験炉、さらに原型炉などの装置を建設し運転するわけですが、その能力を持つ主体が現在あるわけではありません。様々な核融合企業がプラズマ装置を開発していますが、核燃焼プラズマに成功したとしても核融合装置、さらにプラントを構築する技術はまだ世界にありません。そこで京都フュージョニアリング社は、この核融合装置とエンジニアリング、という事業に着手したわけです。現在、約100名の従業員、100億以上の資金を集め、日米英に拠点を置いて活動しています。

現在の事業分野は大きく3つに注力しています。第一は、プラズマを生成加熱するのに不可欠な電子サイクロトロン共鳴周波数帯の発振器、ジャイロトロンとその周辺装置です。核融合装置はエネルギー増幅器であり、1GWの核融合出力が得たければ、数10MWの加熱入力が必要で、100GHz周波数帯で連続的に発振するシステムを供給しています。第二は中性子エネルギーを変換し、燃料であるトリウムを製造する装置「ブランケット」システムの技術です。これは単にプラズマの周りで核融合反応のエネルギーを受け止める部分だけでなく、そこに熱媒体を循環してエネルギーを電力に変換したり、水

素を製造したり、あるいは燃料となるトリチウムを連続的に抽出する、というプラントになります。第三はこのトリチウム燃料を循環して連続的にプラズマに供給する燃料サイクルです。核融合のプラズマは数%しか燃焼せず、排ガスの大部分が未燃焼なのでこれを処理して再利用し、また前記ブランケットでの生成成分を加えないと運転を継続できません。また水素の放射性同位体であるトリチウムを安全に閉じ込め、従事者や環境への影響を最小限に制限する機能も持っています。

図2にこのトリチウム燃料系の概念図を示します。現在、カナダのチョークリバー国立研究所と協力して、世界初となるこの技術の実証試験施設の建設プロジェクトを開始しています。このシステムは、核融合のトリチウムシステムを統合的に実証しようとするもので、磁場方式、慣性方式などの多くの方式に共通に使えて、燃料を処理循環し、精製回収、同位体分離する一方、空気や水からトリチウムを除去するプラント全体を構築するものです。これにより、近い未来の世界の核融合実験にトリチウム取り扱い技術を提供できるようになる計画です。

さらにもう少し先に目を向ければ、京都フュージョニアリングは、前述の技術分野に加え、超伝導磁石やプラズマ計測など核融合プラントに固有な技術の需要にこたえ、最終的には核融合炉プラント全体の構築の可能な企業を目指しています。

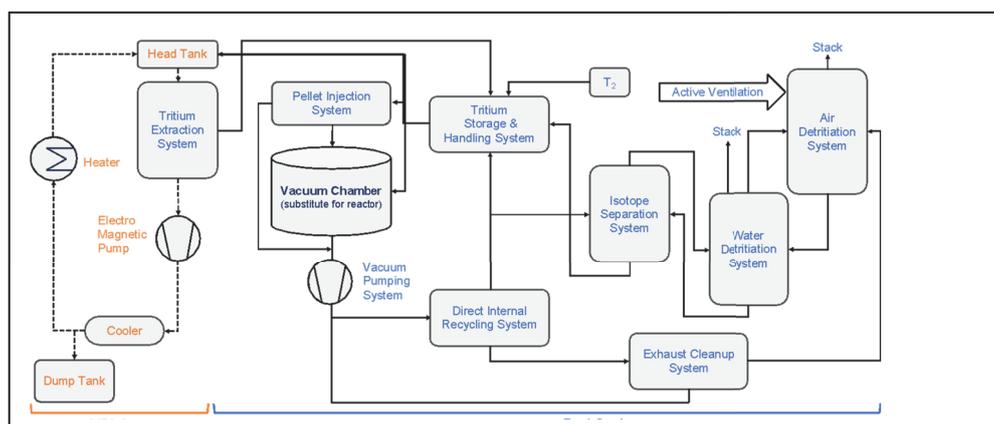


図2. 京都フュージョニアリングとチョークリバー国立研究所の共同事業 UNITY-2 の概要

### 3. スタートアップと実用化戦略

少なくとも大学発スタートアップ企業の主要な活動は販売ではありません。イノベーションであり、それを通じた企業自体の成長です。研究者や学生さんからよく「何で儲けるのですか？」と聞かれるので誤解されていることがわかるのですが、投資は借金ではなく、国家予算でもなく、社会の蓄えた資産を期待される分野の成長のために使うものです。現在プライベート核融合に投資が集まる理由は、それまで化石資源を資産とってきた社会が、石油や石炭が燃やせない—二酸化炭素を出せない、という理由でその資産の先行きに不安を感じる一方、核融合を脱炭素エネルギーの切り札と期待していることが一因にあります。投資は会社自体になされるので、その企業価値（valuation）が増えれば成功で、投資者は保有資産を増やすことができるのです。いま世界で動いているのは、脱炭素と持続可能性を目指した社会資源、資本の大きな流れの変化であり、資源ではなく、科学技術を中心とした価値社会の構築とみなせるのです。

核融合スタートアップは早期実現を目指している、といってもそれが簡単な目標でなく、まだ多くのイノベーションが必要なことは理解しており、それに挑戦することで企業価値を高めます。数年単位の早い周期での研究開発設備の拡充と技術革新は不可欠であり、これができなければ次の段階の資金調達はできません。技術開発の成功は、もちろん顧客獲得につながる売り上げの見込みがなければ投資は

受けられないのですが、技術自体の斬新さや魅力、産業として自立できる成熟度が重要です。スタートアップはイノベーションを目指すもの、といっても起業されるベンチャーの大部分はITやバイオなどの大型設備を要しない分野に偏っています。起業はしても実験室レベルと産業化の間にはいわゆる「死の谷」があって、電気などエネルギー分野では特に、投資環境や人材、設備、行政による規制、様々な企業との取引環境など、成長を可能とする「エコシステム」の課題が多くなっています。

大学発ベンチャーには、初期的には大学の研究インフラとして産学共同利用設備や大学との共同研究、特に高度な計測分析装置やその利用技術、端的には大電力の受電など、通常民間では利用困難な資源が使える利点があります。さらに研究者ネットワークや卒業生の就職先を通じた企業との連携、あるいは人材そのものの供給源でも大学とその卒業生は重要な意味を持っています。資金調達や、様々な特殊原材料、加工技術を持った会社との付き合いもそうですが、最終的に、その分野のサプライチェーンを構築することが起業の目的なのです。工学を理工系の学問として狭くとらえるのではなく、経済や経営、社会まで視野を広げると、スタートアップの役割が見えてきます。フュージョンを産業化しようとするとき、その技術を社会で実際に使うことを可能にする「装置」として、「会社」という形式を選択し、また実際にそれを構築したことになります。会社は、自分で投資を集め、人材を集め、会社のネットワークを組み、サプライチェーンを構築することで、新たな産業分野をつくることができます。同じことをやりたい人が集まっているので、異なる意見を調整する組織よりはるかに意思決定が早く、また資金さえ獲得できれば予算の制約も緩和されます。なにより、急速に拡大する会社は、自在に合目的な組織を構築することができます。核融合は、始まって60年、少し実施体制が古くなり、柔軟性が失われているようです。予算や人員が急速に変化しづらい既存組織の困難を克服し、人材や知識の継承を図る必要があるでしょう。

これまでわが国では、原子力分野でもふげんやもんじゅなどの新型炉は技術開発はともかく、産業化に至っていません。拡大するスタートアップとして、京都フュージョニアリング社は、新たに構築するフュージョンエネルギー産業の中核となることを意図しています。わが国には優れたモノづくりの技術があり、原子力や電気、あるいはエネルギー産業には多くの高度技術がありますので、核融合ではそれらの組み合わせ、すり合わせを再構築することで新たな産業の発生が期待できるのです。

#### 4. まとめ

大学発ベンチャーの事業についてご紹介してきましたが、おかげさまで京都フュージョニアリング社は順調に成長し、当初目的のフュージョンエネルギーの実用化、さらにその先にある、人類社会の持続的なゼロカーボンサイクルの達成に貢献したいと考えています。京都フュージョニアリングは単に核融合の工学研究の実用化を目指す会社ではなく、総合的なエネルギーとカーボンの新たな社会システムを構築するというコンセプトを持っています。京大の特徴的な学際研究スタイルの一つの事例といえると思いますが、工学分野にとどまらず、「生存基盤科学研究ユニット」等の複数部局にまたがる研究の成果もその起業コンセプトに含まれています。図3はその実例ですが、フュージョンをエネルギー源として一つの重要な要素においていますが、それをもとに持続可能なエネルギー社会を構築するコンセプトです。こうした研究を深めることが、結果として投資家に理解を得たり、核融合の市場性、経済性を分析して会社経営に役立てることにもつながっています。

京大は現在は産学連携本部など、組織的機構的な体制もかなり整っていて、恵まれたサポート環境があります。一方では、昔からの学術ディシプリンも残っているので、意思決定の遅さや新たな枠組みの構築には困難もありますが、これはわが国大学の共通の問題でもあるでしょう。学生や教員も、必ずしもスタートアップや起業に前向きな人ばかりではない、というかここでも世界のトップレベルとは相当な開きがあります。その一方で、大学の研究成果を学会や学術誌にとどまらず、社会につなげたい、実

