

| | |
|--------------|---|
| Title | 欧米核融合ベンチャーの資金調達バリエーションの妥当性 : 社会インフラ産業の新たな民間主導の社会実装アプローチ |
| Author(s) | 服部, 健一 |
| Citation | 年次学術大会講演要旨集, 37: 369-372 |
| Issue Date | 2022-10-29 |
| Type | Conference Paper |
| Text version | publisher |
| URL | http://hdl.handle.net/10119/18634 |
| Rights | 本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management. |
| Description | 一般講演要旨 |

欧米核融合ベンチャーの 資金調達バリエーションの妥当性 -社会インフラ産業の新たな民間主導の社会実装アプローチ-

服部健一（元（株）INCJ）

khattori@aspectx.space

1. はじめに

近年核融合の実用化への期待が、CO₂ 排出削減が早期に求められる中で大きくなっている。しかし、核融合の開発はもとより大きな費用と時間がかかるものであり、現在の ITER 及び後継の原型炉の計画によれば、社会実装は 2050 年頃である。そこで、より早期に核融合を実用化すべく、昨今、複数の欧米ベンチャーで、民間ベンチャーキャピタル（VC）から 1000 億円クラスの極めて大型の資金調達が行われた。これは一般的な VC 投資と比較すると、極めて異例の事である。果たして、この投資はどのような考え方とロジックで説明され得るのか、投資はペイするのか、又このアプローチは、研究の社会実装においてどのような意味合いを持つのか、VC の投資分析メソッドを用いて検討を行う。

2. 先行研究

不確定性の高いベンチャーのバリエーションや、テクノロジー系ベンチャーの評価については多くの研究がなされ、ほぼ一般化されている[1]。しかし、核融合ベンチャーのような、巨額長期ハイリスクな場合の評価の研究は未だなかった。

3. 核融合ベンチャーと民間 VC 資金供給の現状

(1) 核融合研究開発の実用化の流れ[2]

核融合研究は、1990 年代後半に 3 大トカマク（JET, JT-60, TFTR）により、臨界プラズマ条件（ $Q > 1$: $Q = \text{核融合反応による熱出力エネルギー} / \text{入力エネルギー}$ ）が達成され、科学的実証が成された。現在は次のステップとして、ITER（International Thermonuclear Experimental Reactor: 国際熱核融合実験炉）プロジェクトが国際協力で進んでいる。建設地はフランスである。ITER では、核融合反応の熱エネルギーを電気エネルギーに変換し、一定の時間安定に発電できる事を実証する事がミッションである。巨額の開発費用（2 兆円）は、参加国で負担されている。2025 年ファーストプラズマ、2035 年本格的核融合運転というスケジュールである。その後、数 10M W 程度の安定発電を行う「実証炉」プロジェクトを経て、2050 年代に「実用炉」が電力グリッドに組み込まれ、社会実装される計画である。

しかし、上記の計画では 2050 年カーボンニュートラルという世界的な目標に対して、核融合は貢献できないため、「ベンチャーによってもっと早期に核融合発電を実現しよう」、という気運と活動が 2010 年代に生まれて来た。このような「国のみに頼らず、民間ベンチャーも交えて加速すべき」というアプローチは、1990 年-2000 年に米国で行われた「ヒトゲノム解読プロジェクト」の再現とも言える。

(2) 核融合ベンチャーの現出 [3]

(A) 従来の保守本流方式の先進化

ベンチャーとして、最も科学的な知見と実績のあるトカマクを尊重しつつも、その路線上でさらに先進的な改善を行うものである。具体的には、超伝導新材料を用いたトロイダルコイルにより中心軸を細くし、閉じ込め性能上有利な「球状トカマク」である。米国 MIT スピンアウトの CFS (Commonwealth Fusion Systems) 社、英国カラム研究所スピンアウトの Tokamak Energy 社が例である(図 1)。CFS は、Tiger, Temasek, Khosla 等の VC や、Google, Eni (イタリア電力会社) 等の事業会社から \$ 2 B (約 2800 億円) の資金調達を行い、実験炉 SPARC (核融合出力 140MW, $Q = 2$) を建設中、その後 ARC (Affordable Robust Compact) という電気出力 25 万 kw のデモプラントを 2030 年代に運転すべく計画中的である。

(B) 古くからの傍流

トカマクの課題である低 β (プラズマ圧力/磁気圧力~経済性に直結)、トリチウムの存在、核反応生成物の高速中性子による第一壁損傷問題を一気に解決するために、高 β 閉じ込め方式の FRC (Field Reversed

Configuration)によって、 He_3 やボロンを用いた核融合反応（実現条件はより厳しい）を行うものである。過去にはプラズマ性能がトカマクに比べ劣位であったため、主流研究ではなかったが、この究極の可能性を信じて研究を肅々と遂行したのが、米国 UC-Urvine の故 Rostoker 教授らによって 1998 年に設立された TAE-(Tri-Alpha Energy) Technologies 社である。当初はマイクロソフト創立者の一人である Paul Allen 氏の支援を受けて成長した。既に電子温度 5keV を達成している。

(C) 確立された炉工技術を活用した新アイデア方式

トカマクの実用化が炉工学の面で困難ならば、逆に、炉工的には既に確立された（Engineering Readiness ある）技術を応用し、安価かつ早期に核融合を実現しようというアイデアである。炉心プラズマの面では、トカマク以外の方式で、さらに新しいアイデアを付加してシステム化しようというアプローチである。

参考となる事例は、宇宙ベンチャーによる宇宙産業のイノベーションである。宇宙産業は、国家プロジェクトであったアポロ計画によって一定の証明がなされたが、高価な事が難点であった。これをベンチャーの SpaceX が、IT を中心とした安価で高性能の民生技術を適用し、又ロケットの再利用の実現などにより、経済的なビジネスとして成立する事を証明し、解決した。このアナロジーを核融合に適用したものである。但し、宇宙産業はアポロ計画によって既に実証されたものであるが、又ほぼ線形力学系によって制御され得るものであるが、非トカマク系核融合では、その炉心プラズマ性能の科学的実証が未だ成されておらず、又より複雑で非線形系であるという、大きな相違点がある。

この試みは、以前より米国 ARPA-E の予算によって検討が行われ、様々なアイデアの提案と採択、予備的研究が進んだ。その結果、General Fusion 社（磁気ターゲット圧縮方式）、Helion 社（パルス FRC）、ZAP Energy 社（シアフロー安定化 Z ピンチ）等である。又、ARPA-E とは独立に、First Light Fusion 社（慣性方式）も設立されている。

(B)、(C) に対しては、当然従来の本流研究サイドからは、そもそも過去の研究が、選択と集中の段階でドロップしたものであり、あり得ない、という反対論が多い[4]。しかし、これらのベンチャーは新たなアイデアを加えたものであり、又過去のイノベーションの歴史からは、予期していなかったブレークスルーがダメだと思われていた分野から起こる場合もあり、可能性がゼロとも言い切れないであろう。

(3) VC の投資におけるバリュエーション（標準モデル） [1]

VC は、安定した事業に対する融資とは異なり、ハイリスクハイリターンビジネスに投資するため、以下のメソッドによる投資対象ベンチャーの経済的バリュエーション（企業価値評価）を重視する。

- ・そのベンチャーが将来生み出すキャッシュフローはどのようなものか？
- ・どの程度のリスクファクター・ディスカウントレート(DR)を取るべきか？
- ・キャッシュフローをその R で現在価値 NPV(Net Present Value)に割り戻すと、どの程度か？
- ・その NPV はベンチャー企業が主張する企業価値よりも低いのか？

低ければ投資価値はあり投資し、高ければしない、という判断を下す。尚、 $NPV = \sum (CF_n / (1+DR)^n)$ と表される(DCF法)。 CF_n は n 年後のキャッシュフロー（当期利益+減価償却費）である。

(4) 核融合ベンチャーのバリュエーション

このバリュエーションメソッドを適用する場合、核融合ベンチャーの将来のキャッシュフローがわかっている必要があるが、それは困難であるし、公開していない。従って、以下のメソッドを用いる。

1. 他社他産業を参考に、上場時バリュエーション(EV_1)を評価
2. 研究開発リスクから、ディスカウントレート R を評価
3. EV_1 を R で現在価値に割り戻し、 EV_2 を得る。

この EV_2 が理論値であり、一方で実際の値（研究でいうところの実験値）が、VC 投資の際に交渉・株式売買で取引成立で契約した値である。

具体的には、これらの核融合ベンチャーが 10 年後に開発に成功し、株式上場する事を想定して、数値的評価を以下進めてみよう：

① $EV_1 = \text{産業規模} \times \alpha$

・EV の例では、将来産業規模が約 80 兆円 [4]、テスラ社の時価総額（バリュエーション）が 80-100 兆円なので、 $\alpha = 1-1.2$ である。

・宇宙の例では、将来産業規模が 90 兆円 [5]、SpaceX の時価総額が現在 15 兆円、公開時は 20-50 兆円と評価されているため、 $\alpha = 0.3-0.5$ である。

ここでは両者の中間を採用し、 $\alpha = 0.5$ とする。

核融合の産業規模は、現在の電力市場からの推定で、将来（2040-50年頃）グローバルスケールで400-500兆円であり、内核融合比率を3割と仮定すると、120兆円程度であろう。実際には、核融合ベンチャーの付加価値は、ロイヤルティ相当と思われるので、ロイヤルティ一般値の5%を仮定すると、アドレス可能な産業規模は、120兆円 \times 0.05=6兆円となる。従って、 $EV_1 = \text{産業規模} \times \alpha = 6 \text{兆円} \times 0.5 = 3 \text{兆円}$ となる。

② DR (ディスカウントレート)

DRは成功確率と期待ファンド倍率の関数であり、

$$\text{(総合) 期待ファンド倍率} = \Sigma (\text{案件数積分}) \text{ 案件リターン} / \text{全投資額} \\ \sim (\text{平均期待}) \text{成功率 } S \times (1 + DR^N)$$

と表せる。DRは、利率とも考えられるので、一定のファンド倍率（例、2）を達成するためには、成功率が低い場合は、成功した場合の利率DRが大きくないといけない。なぜなら、高いDRでないと、その成功案件で、他の失敗案件（リターン=ゼロ）分の損失を埋め合わせできないからである。

実際に計算すると、期待倍率2倍のファンドの場合、成功率 $S=1/3$ では $DR=20\%$ である。これは、1件の成功時の倍率が $1.2^{10}=6$ であり、6倍ならば、3件中他の2件の成果がゼロでも、6倍/3件=2であり、ファンド全体の倍率2を達成できるという意味である。同様 $(S, DR) = (1/4, 24\%), (1/5, 27\%), (1/10, 35\%)$ である。又、ファンド全体倍率=1.2の場合は、 $(S, DR) = (1/3, 14\%), (1/4, 16\%), (1/5, 18\%), (1/10, 25\%)$ である。

問題は、期待成功率Sの評価である。

上記(B)「最近の保守本流方式の先進化」の場合は、炉心プラズマの科学的証明はほぼなされている（厳密には核燃焼プラズマの挙動に関する不確定性が残るが相対的にはリスクは小さいとここでは解釈する）。3大トカマクがほぼ臨界プラズマを達成している事、出身母体のMITのAlcator-CModも3.5keVを達成している事からも妥当であろう。残るものは炉工的リスクである。Alcator-CModで超伝導トロイダルコイル20テスラの運転実績があるが、高温超伝導新材料による極めて細いトロイダルコイルのセンターソレノイドを熱シールド、中性子シールドする事は新たなチャレンジである。又、ブランケットのリチウム増倍と熱交換機能、第一壁の対高エネルギー中性子損傷対策、ダイバータ部における熱・不純物制御など大きな課題が残っている。コンパクトになった分だけ、材料にかかる負荷はITERよりも厳しくなっている。材料開発は究極的にはサイエンスリスクと言えなくもない。これらを総合的に考慮すると、決して簡単なR&Dではなく、成功確率 $S \sim 1/5$ (2割)程度と評価される。

逆に、上記の(A),(C)の場合は、炉工システムについては、トカマクに比べ相当確立した（エンジニアリング・レディネスのある）技術を採用したり、高難度の課題を閉じ込め方式によって迂回し、リスクを減らしている。一方、炉心プラズマのサイエンスリスクは、未だ臨界プラズマ条件を達成していない事からも、依然残っている。従って、サイエンスリスクのシリアス性を考えると、 $S=1/10$ (1割)と評価すべきであろう。

③ EV_1 をDRで現在価値に割り戻し、 EV_2 を得る。

DRについては、 $S=1/5$ の場合、期待倍率1.5のファンドでは、前記の(S,DR)セットから、 $DR=27\%$ 。期待倍率1.2のファンドでは、 $DR=18\%$ である。投資期間N年とすると「現在値への割り戻し」は $1/(1+DR)^N$ を上場時の期待時価総額 EV_1 にかける事に相当する。

この割り戻し比($1/(1+DR)^N$)は、投資期間 $N=10$ 年、 $DR=27\%$ では0.12、 $DR=18\%$ では0.2である。これを上記の $EV_1=3$ 兆円にかけると、各々 $EV_2=3 \times 0.12=0.36$ 兆円、 $3 \times 0.2=0.6$ 兆円を得る。

④ 理論値 EV_2 と現実との比較

まず、CFS (Commonwealth Fusion Systems)社は、これまで累計\$2B~2800億円を調達し、現在のバリュエーションは約\$8B~1.1兆円である [5]。CFSへの主要投資家は、Tiger Global Management Fund (TGM), Bill Gates, Temasek 等である。TGMはハイテク投資を大規模に行なっているNYベースのファンドであり、運用金額は125ビリオンドル~17兆円である。過去にはAlibaba, Facebook, Waymo(Googleによる自動運転ベンチャー)等に投資しており、ファンドの倍率は10年で3-5倍の場合もあった。しかし、近年はDiversityやESG(環境ソーシャルグリーン)方針の投資も行なっており、その観点での投資と思われる。Temasekはシンガポールの官民ファンドであり、過去の投資成績は概ね1.5倍程度であるが、TGM同様ESG投資も重視している。Bill Gatesは個人なので、フィランソロフイーの観点で投資している面もあろう。以上を考えると、投資家の期待ファンドマルチプルは、1.2程度と想定される。

この場合でも、理論値 EV_2 は0.6兆円なので、実際値1.1兆円は約2倍の過大評価である。こ

これは、 $DR = 0.1$ に対応する。これは、ファンド倍率 1.2 の場合は成功確率 $S=1/2$ 、ファンド倍率 2 の場合は、成功確率 $S=2/3$ に対応する。これらの成功確率 S は、理論値でおいた $S=1/5$ より大きいため、投資家は「リスクというより、多分成功する」と見ていると想定される。MIT 出身者への信頼と期待とも取れるし、場合によっては、核融合開発の困難さを過小評価した可能性もある。

逆に、上記 B,C の Engineering Ready/Science Unproven の場合を見てみよう。TAE テクノロジー社で同様の議論を展開すると、成功確率 $S=1/10$ の場合は、ファンド期待倍率 1.5 の場合、 $DR=27\%$ 、割引比率 $(1/(1+DR))^{10}$ は 0.1 となるため、バリュエーションの理論値は EV_1 の 3 兆円に 0.1 をかけて、 $EV_2=3000$ 億円を得る。一方実際値は 3500 億円であるため[6]、概ね合致する。

同様の評価を他の核融合ベンチャーで行うと、Tokamak Energy, General Fusion, ZAP, First Light Fusion は誤差の範囲内で合致するが、Helion は過大評価（理論値<実際値）である[6]。

4. 議論

以上の検討で、近年の核融合ベンチャーのバリュエーションが、今回の評価モデルで概ね説明可能、すなわち妥当なものであるとわかったが、一部(CFS)は相当過大評価されている可能性が高い。これは、ビッグネームのベンチャーへの信頼と期待とも取れるし、技術リスクの過小評価とも解釈できる。筆者は後者とみる。結果は 10 年後に明らかになる。尚、過大評価が問題であるのは、開発計画が遅延した場合、株価が高すぎて追加の資金調達ができなくなるか、株価を下げて調達するとベンチャー自身の保有株式シェアが想定より下がり、経営の自由度を失うリスクがあるからである。

バリュエーションに関連して別の重要な視点も今回明らかになった。それは、既に多くの核融合ベンチャーが設立され、かつ数 100~数 1000 億円にも上る巨額の投資が、グローバルに多数の VC によって行われている事である。これにより、国や国際協力の研究開発予算だけであったならば、不可能であった多様なアイデアを試す事が実現されており、関連する新しい特許も申請されつつある。結果的には失敗に終わり、「それ見たことか」に終わる可能性もあるが、新しいイノベーションが生まれる可能性もある（図 2）。いずれにせよ、ARPA-E のような戦略的思想による進化を支援する場づくりと予算提供が重要である。さらに、研究開発サイドの柔軟なアイデア発案、又投資サイドのプロとしての目利き力、大胆な投資意思決定、それを裏付ける体力・資金力、これらのトータルなエコシステムの存在が不可欠と認識される。この醸成のためには、文系理系の相互に、事象に対する表面的でない深い理解とチャレンジマインドが必須であろう。

参考文献

- [1] マッキンゼー著、企業価値評価（第 7 版）、ダイヤモンド社（2022 年）
- [2] 鎌田裕、石田、小関、菊池著、日本原子力学会誌、39 巻 5 号、p367-377 (1997 年)
- [3] P.Lobner, The Fork in the Road to Electric Power from Fusion, Feb., 2021, <https://lynceans.org/tag/first-light-fusion/>
- [4] D. Jassby, Voodoo Fusion Energy, American Physics and Society [April 2019 Newsletter](#), p 13-16.
- [5] Crunchbase, CFS Pre-Money Valuation, <https://www.crunchbase.com>
- [6] 服部健一、投稿準備中。

図1. 核融合ベンチャーのポジション

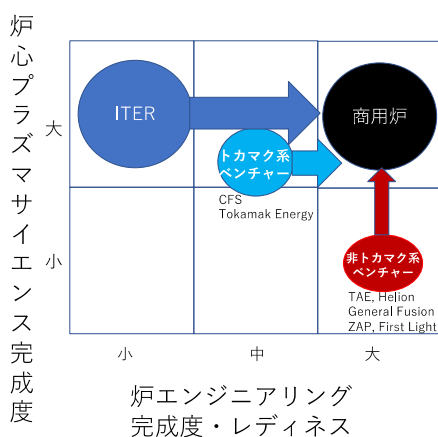


図2. 国プロとベンチャーの特徴比較

| | 国プロ | ベンチャー |
|--------|---------------------------------|---------------------------|
| 資金出し手 | 国 (税金) | 民間 (ESG 系大手VC、 篤志家) |
| 投資額 | 大 (数兆円) | 小 (数百~数千億円) |
| 重視点 | きちんと やり遂げる/ 実証知見の 積み重ね | 早く実現する/ 創造的アイデア |
| リスクテイク | 慎重 | 大胆 |
| 合意形成 | 共同委員会 | 主要推進者 |
| スピード | 遅い | 早い |