



欧米核融合ベンチャーへのベンチャーキャピタル投資の経済合理性 - リスクマネーと巨大応用科学の接点 -

Financial Validation of VC-Investment on Nuclear Fusion Start-Ups in the US and Europe

服部 健一

HATTORI Kenichi

ベンチャーキャピタリスト (元 株式会社INCJ)

(原稿受付: 2023年1月17日)

近年欧米において30社にも及ぶ核融合ベンチャーが生まれ、ベンチャーキャピタル (VC) から合計数千億円にも上る投資が行われている。この目的は、2050年 CO₂排出ゼロの実現のために、核融合の実用化を加速することであり、民間活力の際たる面と言える。しかし、ここには不確定性が相当あり、未だ売上のないベンチャーに対しこれほど巨額な投資が民間 VC から行われることは異例である。果たして、VC はどのような考え方で核融合ベンチャーに巨額の投資を行い、将来回収しようとしているのか、金融業界の考え方や経済性の評価方法を紹介する。又、VC 投資の核融合研究開発への意味合いを論じる。

Keywords:

fusion, venture capital, risk money, start-up, commercialization, economics, valuation, discount rate

1. はじめに

近年核融合の早期実用化への期待が、CO₂排出削減の必要性から高まっている。そして、2050年ゼロカーボンに向けて、粛々と開発を進める正統派の国際熱核融合実験炉ITERを補完する意味で「ベンチャーによって、より早期に低開発コストで核融合発電を実現しよう」という気運が生まれ、直近6年で21社、累計33社にも上るベンチャー (スタートアップ) が米国を中心に設立された[1]。一部は本誌で過去紹介されている[2, 3]、又、日本でもその動きが始まっている[4]。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年代の「ヒトゲノム計画」、近年の宇宙開発と相通じ、米国では自然な流れであろう。

特筆すべきは、売上が未だ無い核融合ベンチャーに、民間VCから2021年以降約\$3B (~3900億円, 1\$=130円換算, 以下同) もの巨額投資が行われたことである[1]。これは一般的なVC投資と比較すると、極めて異例である。筆者は過去に核融合研究に従事した後、民間事業会社、及びベンチャーキャピタル業界を経験したため、研究サイドと金融サイドの両方の視点を持つ。したがって、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について、金融業界の方法論を、その核融合ベンチャーへの適用例と共に紹介する。又今後の核融合R&Dへの意味合いについても触れる。

2. 欧米の主要核融合ベンチャー

本稿ではこれまでに累積100億円以上の資金調達を行った欧米の核融合ベンチャー7社に注目する、いずれも2020年代後半に実験炉 (ITERに相当)、2030年代前半にDEMO炉を開発し、2030年代後半に電気出力が数100 MWクラスのコンパクト炉を商用化する計画である[1]。

(A) 従来の主流方式のコンパクト化型

最も科学的な知見と実績のあるトカマクの路線上で、さらに先進的な設計を行っているベンチャー企業が、米国MITスピニアウトのCFS (Commonwealth Fusion Systems) 社、英国カラム研究所スピニアウトのTokamak Energy社である。具体的には、フィルム状の超伝導新材料を用いたトロイダルコイルにより中心ソレノイドを細くした、「コンパクト球状トカマク」方式である。特にCFSは、Tiger Global, Temasek, Khosla Venture等のファンドや、Google, Eni (イタリア電力会社) 等の事業会社から約2800億円の資金調達を行い、実験炉SPARC (核融合出力140 MW, Q=2) を建設中である。さらに2020年代後半には原型炉ARC (電気出力250 MW) を運転し、2030年代初頭に商用炉を完成する計画である。

(B) 非トカマク方式シンプル・リアクター型

トカマクの実用化が、炉工学の面で、中性子による第一壁損傷、ブランケット、トリチウムハンドリング、コイル設計建設の複雑さ等、解決すべき課題が多いのならば、逆に非トカマク方式をベースに、既に確立された技

author's e-mail: khattori@aspctx.space

術 (Existing Technologies) を使ったシンプル・リアクターを設計し、課題を回避するアプローチもあり得る。ただし科学的実証が未だなされていないため、新しいアイデアを付加して科学的実証と工学的実証を合わせて行い、2030年代の商用化を計画している。

一例は、高 β 閉じ込め方式のビーム駆動FRC (Field Reversed Configuration) でp-¹¹B核融合を計画するTAE (Tri-Alpha Energy) Technologies社である。TAEは、米国UC-Urvineの故Rostoker教授らによって1998年に設立され、累計1200億円の資金調達を行っている[1]。

TAE以外にも、2015年から米国DoE ARPA-Eの支援[5]によって開発が進んだ複数のベンチャーがある。背景として、宇宙ベンチャーによる宇宙開発イノベーションの実現が大きい。宇宙開発は、国家プロジェクトのアポロ計画によって大きく進んだが、高価でスローなことが難点であった。これをベンチャーのSpaceXやBlue Originが、NASAと連携しITや、安価な民生技術を活用し、ロケット再利用等の工夫により解決した。このアナロジーが核融合に適用されている。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り、又ほぼ線形力学系によって制御され得るものであるが、核融合、特にARPA-Eの対象方式では、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、又より複雑な非線形系であるため、難度がより高いと思われる。

具体的には、以下のベンチャーである。

- ・ General Fusion (磁気ターゲット圧縮方式)
- ・ ZAP Energy (シアフロー安定化Zピンチ)
- ・ Helion Energy (パルスFRC)
- ・ First Light Fusion (発射物型慣性方式)

(First LightはARPA-Eとは独立の設立[1])。資金面では、General Fusionが400億円、ZAPが260億円、Helionが780億円の調達を行っている。さらにHelionはマイルストーンを達成すれば、追加投資2200億円を受けられるコミットメントを得ている。

尚、科学的実証が未だなされていない場合、一般にはVCは投資しないが、それでも投資したのは、

- ・ TAEの「中性子フリー・直接発電」
- ・ ZAPの直径1ミリ以下のプラズマによる「magnetic confinement without magnet」
- ・ Helionの「未臨界パルス炉・直接発電」

等の小型炉構想を、「もし本当に実現できたら、大きなディスラプティブ・イノベーションを業界にもたらすもので、賭ける価値がある」と判断したからであろう。

その際、当然リアリティが課題となる。実際、従来の本流研究サイドからは「核融合ベンチャーは、Voodoo (呪術的～非科学的) Fusionであろう」という批判が出ている[6]。しかし、これらのベンチャーは過去の研究の単なる復活ではなく、新たなアイデアを加えて検討されたものであり、又イノベーションの歴史を見れば、困難と思われていた分野から、予想外のブレイクスルーが起こった場合もあるので、投資には一定の意義があろう。

3. VC業界の考え方

3.1 存在意義と行動原理

核融合に限らず、ハイリスク・ハイリターンなベンチャーにリスクマネーを供給する存在がVCである。Apple, Google, Genentech, モデルナ等への成長支援が好例である。VCのミッションは以下の2点である。

- 大胆なリスクマネーの供給によるディスラプティブな事業創造
- 機関投資家から委託された資金の高利運用

前者は、従来の融資主体の金融機関では、預金者保護のため、不動産等の担保がない限り、大きな可能性があっても不確定な新規事業には資金供給できないことに起因する。したがって、VCは可能性あるベンチャーに対し、担保無しで個人補償を求めずに大胆な出資を行う。投資がゼロ回収となっても文句は言わない。自己責任の判断の結果だからだ。もちろんその分、投資選定のスクリーニングは厳しく、少数にしか投資しない。ハイリスクなので、その多くは失敗に帰するが、その損失を埋め合わせて余りある利益を少数の大成功案件 (ハイリターン) で生み出し、全体の採算を取る[7]。

VCの投資資金の多くは、年金基金、大学基金、保険会社などの機関投資家から集められる。この機関投資家が資金面でのVCの顧客であり、そのニーズは「高い利回りで資金を運用してほしい」ということである。つまり、機関投資家は、一般的なローリスク・ローリターンである運用 (例、国債) の利率2-3%や、ミドルリスク・ミドルリターンの運用 (例：公開株への投資信託) の利率3-10%よりも高い20-30%又はそれ以上の利率を期待して、全体資産の一部をVCに出資する。VCは、この機関投資家からの高い期待に応える必要があり、これを「受託者責任 (Fiduciary Duty)」と呼ぶ。

利率以外に、「資金を何倍に増やすか」という倍率 (マルチプル) も重要である。倍率は、利率R、運用年数N年で元本を複利運用する場合 $(1+R)^N$ 倍となり、N=10年の場合の例は以下である。

- ・ 国債 (R~3%) : $(1.03)^{10} \sim 1.34$ 倍
- ・ 株式公開会社への投資 (R~3-10%) : $(1.07)^{10} \sim 2.0$ 倍
- ・ VCへの出資 (R~15%) : $(1.15)^{10} \sim 4.0$ 倍

機関投資家はこれらのリスクリターン・プロファイルを考慮して、3者のバランスを決める。

VCファンドの活動は、例えば10年期限の場合、初期2-3年で投資、次の4-5年でバリュエーションアップ支援と追加投資、最後の3年で投資回収を行う。ファンド終了時に、回収資金を、出資割合に応じて出資者に分配して戻す。VC自身も、目標以上に利益が出た場合に、管理費用とは別に利益の一部を受け取る。

このようにVCは、産業創造の一翼を担うと同時に、民間企業として高い利益を期待されていることが、補助金や市中銀行と大きく異なる。したがって行動原理は、「インパクトある事業を創造し得るベンチャーを探し当て投資することと、同時に資本の論理に基づき「株式を安く買って、高く売る」ことである。ただし買い叩くこと

は本意ではなく、実際には「株価が一定の許容範囲内であればよし」とし、VCによって判断が分かれるアーリー段階のベンチャーの可能性を見抜き、正当に高い評価で買い、支援したいベンチャーの株主に積極的になることもある。支援とは、取締役派遣、顧客紹介や、人材紹介、戦略アドバイス等であり、特にハンズオン型VCで力を入れる機能である（資金提供のみのVCも存在する）。

又マクロエコノミクス的に見ると、VC投資は研究成果を活用した事業を世の中に送り出し、社会の役に立つと共に、成功すれば「ベンチャー、VC、機関投資家が法人税を払い、それが国の予算の一部となり、アカデミアに研究予算となって戻る」という資本環流にも貢献するのである。

3.2 投資判断

(1) 概要

日本のVCファンドの例は、100億円を10年運用し、1件2-3億円の投資を30件程度行うものである（米国では、より大型のVCが多い）。よい投資機会を探し、投資し、初回投資が良好ならば追加投資も行う。

一方、ベンチャーは、会社設立後資本政策に則り、以下のように1.5~2年毎の各ステージで目標を設定し、資金調達を行う。

- ・アーリー（シリーズA）：Proof of Concept (PoC)
- ・ミドル（シリーズB, C）：商品完成、事業立ち上げ
- ・レイター（シリーズD, E）：事業本格拡大

尚、ここで、PoC（概念証明）とは、「製品アイデアは実際に現実化できるか?」、「アカデミア論文の再現性はどの程度か?」、「この製品は本当に顧客の求めるものか?」、「ビジネスモデルは機能するか?」、等の「製品・ビジネス的PoC」であり、アカデミアの「科学的PoC」は論文や特許取得で完了していることが前提である。即ち、核融合ベンチャーの場合、「こういうやり方をすれば臨界プラズマ条件は達成可能である」という命題が証明済であることが、本来は求められる。

ベンチャーがVCに出資の検討依頼・提案を行うと（VCから提案する場合もある）VCは投資検討に着手する。まず提案内容（会社設立趣旨、チーム、事業内容、強み、資金調達額・資金使途等）をレビューする。次に、これはと思われる事業アイデアや革新的技術を持ったベンチャーと秘密保持契約を結び、デューデリジェンス（DD）に進む。DDは、一般に以下の視点で行う。

- ① 事業・商品の魅力度・インパクト
- ② 市場性（ニーズの強さ、市場規模）
- ③ 競争優位性（特許、技術、製品）
- ④ 実現リアリティ（製品化・量産・営業）
- ⑤ 経営力・実行力・チーム
- ⑥ 事業計画
- ⑦ 投資のリスクリターン

事業コンセプトや技術の魅力度・インパクト（①）が最重要であるが、理解の精度を上げるために②~⑤を検討し⑥の事業計画を吟味し、⑦のリスクリターン（儲かるか?）を評価する。その上で総合的に投資の是非を判断

する。

尚、出資額が小さいシード段階では、判断は直感や定性的検討で気軽に行う場合もあるが、出資額が大きくなる段階では投資失敗の場合のダメージが大きいため、判断には大きな責任を伴い慎重を要する。ここで重要な役割を果たすのが、「リード投資家」である。「リード投資家」はそのシリーズの資金調達額の多く（例、総額10億円の内5億円）を拠出し、特に詳細にDDを行って、企業価値・株価でベンチャーと合意し、取締役を派遣することもある。多数のフォロー投資家は、リード投資家の投資条件に準じて少額出資する（例、残り5億円を5000万円×10社）。

このリード投資家が行う投資検討は簡単ではない。なぜなら、ベンチャーは過去にない事業や技術を扱っているため、参考情報が限られている上に、短期間（1-2ヶ月）で調査分析する必要があるからだ（半年も時間をかけてはベンチャーが潰れてしまう）。根源には、「集中して急速な成長を志向する」というベンチャーの狩猟民族的な特性がある（もちろん、ベンチャーによる事業化のみを礼賛する訳ではない）。

(2) 投資回収・リターン

あるVC（例VC1）がベンチャーに資金を出資すると、VC1は等価の株式を得て、相当するシェアを保有する株主となる（Entryと称する）。開発や事業化が進み、マイルストーンを達成すると、ベンチャーは次のステージの開発資金を得るために、企業価値（バリュエーション、後述）及び株価を上げて新規に株式を発行し、新たに資金調達を行う。VC1以外にもVC2、VC3と投資家は増え、結果として、当初のVC1の保有シェアは減少する（希釈化）。

数年後にベンチャーが成長し、株式公開やM&A（企業による買収）等の機会が来ると、VC1は保有株式を売却して現金化し、投資回収する（マネタイズ）。これでVC1は株主でなくなる（Exitと称する）。Exit時のVC1の経済的価値は、Exitを添字として、

$$(\text{保有株式価値})_{\text{Exit}} = (\text{企業価値})_{\text{Exit}} \times (\text{持分シェア})_{\text{Exit}}$$

と表せる。Entry時に比べ、右辺第2項（シェア）は、追加投資しなければ減少する。したがって投資回収では、第1項の企業価値の増加が、第2項の減少を補う以上に、「大幅に増える」ことが求められる。

では、企業価値が将来「大幅に増える」とは、又持分シェアをより多く持つ（即ち安い企業価値で買う）とは、どの程度なら良いのだろうか？これらに答えるには、Entryの企業価値をインパクトとリスクを考慮して、定量的に検討する必要がある。

(3) ベンチャーの企業価値評価

そもそも「企業価値（バリュエーション）」とは、経済的には

$$\begin{aligned} \text{企業価値} &= \text{NPV (Net Present Value : 正味現在価値)} \\ &= \text{将来のキャッシュフローを現在価値に割り戻した総和} \\ &= \sum (CF_n / (1+R)^n) \end{aligned} \quad (1)$$

と表される (DCF法) [8]. ここで, CF_n は「 n 年後のキャッシュフロー」(当期利益+減価償却費), R は「割引率」であり, 公開会社の場合は WACC (Weighted Average Capital Cost: 融資と株式市場からの加重平均資本調達コスト) を使う. 一方実際には,

$$\begin{aligned} \text{企業価値} &= \text{時価総額} = \text{株価} \times \text{発行済み株式数} \\ &= \text{純利益} \times \text{PER} \end{aligned} \quad (2)$$

である (株式公開会社の場合). ここで PER (株価収益率, Price Earnings Ratio) は, 株価 / 一株利益であり, 業界別に異なるが 10~20 である. これは, その企業を買収した場合, 利益で買収金額を回収するのにかかる年数に相当する (実際には, 相乗効果によってもっと短い). 公開企業の株価や PER は, 株式が売買可能なため日々変動し, 会社によって異なる. これは, PER が成長期待度や人気に左右されるからであり, 100 になる場合もある.

ベンチャー企業は, 赤字かつ将来計画も不確定なので, 上記の評価手法は使えない. したがって, 投資時の企業価値の理論値 V_{Entry} (Entry 時のバリュエーション) は, 所謂「VC メソッド」によって求められる [8]. まず, 将来株式公開し, VC が株式を売却する時の企業価値 V_{Exit} (Exit 時のバリュエーション) を, 株式公開時での事業計画の想定純利益を使い, 上記の式 (2) で評価する. 即ち,

$$V_{\text{Exit}} = \text{上場時想定純利益} \times \text{PER} \quad (3)$$

次に, この V_{Exit} を, ディスカウント率 (割引率) R で現在値に「割引いて」 V_{Entry} を求める. 尚, N を上場までに要する年数とする.

$$V_{\text{Entry}} = V_{\text{Exit}} \times 1 / (1 + R)^N \quad (4)$$

ここで, 割引率 R で割り引く (ディスカウントする) とは, 「将来 X 年の価値があるだろうとベンチャーが主張しても, 現段階ではそれを割り引いて (安く) 評価する」ことである.

なぜなら, 第一に投資回収に長期間かかることは, 機会逸失の犠牲を払っているからである. 例えば, 今 100 万円を利率 3% の国債に投資し複利運用すると, ノーリスクで 10 年後には 134 万円となり ($100 \text{万円} \times (1.03)^{10}$) 34 万円の利益を得られる. この機会を逸失しているので, 逆に将来の 100 万円は, 現在価値では, $100 / 134$ をかけて 75 万円と安く評価される (図 1) (この 75 万円を 10 年運用すれば, $75 \text{万円} \times (1.03)^{10} = 100 \text{万円}$ となる).

第 2 に, ベンチャー投資では, 統計的に, 将来計画が実現されない場合 (絵に描いた餅) が多いためである. 夢を語るのは簡単だが, 実現することは極めて難しく, 過去の統計では, ベンチャー投資の 7 割が損失に帰する [7] ので, 少数の成功案件で多くの失敗案件 (リターン ~ ゼロ) 分の損失を埋め合わせる必要がある.

第 3 に, VC には, 全体の投資倍率を他の投資方法 (国債や公開株投資) よりも高くすることが, 機関投資家から求められるからである (野球でいうホームラン期待).

第 4 に, ステージが進み追加投資が行われるにつれて,

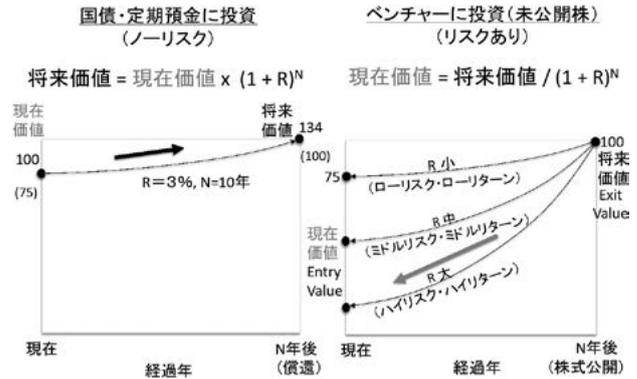


図 1 資本運用の時間的効果. 金利によって資本は複利で増加するので, 逆に将来価値を現在価値に戻す場合は割り引く.

自らの株式保有シェアが下がるため, 投資時にはなるべく保有シェアを高めたい (即ち企業価値評価を低めたい) からである.

実際には, 以下の割引率 R がステージ別に使われる [8].

- ・アーリー (ハイリスク): 40 - 60%
- ・ミドル (ミドルリスク): 30 - 50%
- ・レイター (ローリスク): 10 - 30%

初期段階である程, リスクが大きいので割引率 R を大きく設定し, その結果, 現在価値は小さく評価される.

(4) 割引率 R の評価

実際の割引率 R の設定においては, R とリスクの関係性をモデル化する必要がある. リスクは, ベンチャーのチャレンジの難度が高く不確定なほど高くなり, 「 X 個に 1 つしか成功しない程ハイリスク」と表現できる. 投資目線では, このハイリスク度は, 「成功確率 (Success Rate) S の低さ」と同等である. ここで S を, 「目標達成するのが X 個に 1 個の場合 $1/X$ 」と定義する. 例えば成功が 2 つの案件のうち 1 つと思われる場合 $S = 1/2$, よりハイリスクで成功は 5 つに 1 つと思われる場合 $S = 1/5$ と小さく, R はより大きい.

又, そのファンドの「目標倍率 A 」が大きい程, 案件に高いリターンを期待されるので, 相応に大きな R で割り引くべきである.

この S と A を用いて, 投資期間 N 年の場合の割引率 R は以下の式でモデル化される (導出は付録参照).

$$R = (A/S)^{1/N} - 1 \quad (5)$$

尚, ここで成功確率 S の「成功」とは, 「期間 N 年内 (例, $N = 10$ 年) に目標を達成すること」と規定する. この「期間」の条件は, VC ビジネスで極めて重要である. なぜなら, ファンド期限が来ると, VC は株式を現金化する必要があるが, 計画遅延・未達の場合, 株式公開又は発展的株式売却ができず, 無理に他のファンドや企業に株式を売却しようとしても, 交渉力が弱く相当安い売却額 (場合によっては残酷にもほぼゼロ) になるからだ.

R は, 例えばファンド目標倍率 $A = 3$ 倍, 投資期間 $N = 7$ 年 (ベンチャーの初回資金調達から株式公開までの平均) の場合 (図 2) のようになる. 具体的には,

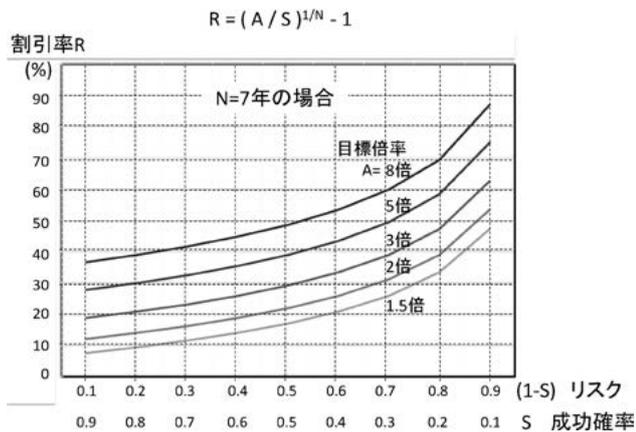


図2 割引率Rのリスク度(1-S)依存性(Sは成功確率)。高いリスク、高いファンド目標倍率の場合、割引率は大きい。

- ・アーリーS=0.1, 0.2, 0.3でR=63%, 47%, 39%,
- ・ミドルS=0.4, 0.5, 0.6でR=33%, 29%, 26%,
- ・レイターS=0.7, 0.8, 0.9でR=23%, 21%, 19%

である。逆算すると、 $S=0.2=1/5$ では $R=47\%$ なので、複利は $(1.47)^7 \approx 15$ 倍である。つまり5件投資し1件が15倍になれば、残りの4件が損失でも、全体リターンは15倍/5件=3倍となる。

尚、この成功確率Sやリスクは、案件毎の担当キャピタリストによって、自身の調査分析と専門家ヒアリング等で評価されるため、本人の経験と知見によって相当幅がある。これは、解析的・実験的に客観化可能な科学・工学の場合と異なるものである。

(5) 投資判断

バリュエーションの面から見た投資の是非は、ベンチャー主張の値を、本稿のような方法による現在価値の評価値(V_{Entry})と比較し、それが適正かで評価する。比較結果のギャップが一定の適正範囲内(例、2-3割以内)であれば投資し、ベンチャー主張値 $\gg V_{Entry}$ ならば投資しない、又は値下げ交渉を行うという判断を行う。

尚、この投資判断は、このベンチャーに投資した場合に期待できるIRR(Internal Rate of Return:内部収益率)が、期待値以上かどうかでも評価できる。ここでIRRは、次式の所謂「複利」である。

$$V_{Exit} = V_{Entry} \times (1 + IRR)^N \quad (6)$$

尚、式(4)と式(6)は同等なので、IRRとRは実質等価である。

VCは、このようなスクリーニングを行い、将来大きく成長すると思われるベンチャーのみに投資を行う。ただし、買い叩くことを意味するだけでなく、適切にベンチャーの将来ポテンシャルを見抜き、他のVCが「高過ぎる」、「不確定すぎる」と考えて投資しないベンチャーに対し、果敢に気持ちよく投資することも重要である(甘い投資と紙一重であることが難しい点である)。

4. 欧米核融合ベンチャーへの具体的適用

以上のバリュエーション評価法を、実際の核融合ベンチャーに適用し、巨額投資の妥当性を見てもよう。

4.1 V_{Exit} (将来株式公開時の企業価値)

現在の段階では、各核融合ベンチャーの将来の売上利益計画は不明なため、昨今の他産業事例を参考に以下の式で評価する。

$$V_{Exit} = \text{産業規模} \times \alpha$$

- ・電気自動車産業の場合、将来産業規模(世界)が約80兆円、テスラ社の時価総額が80-100兆円なので[9]、 $\alpha=1-1.2$ である。
- ・宇宙産業の場合、将来産業規模が90兆円、SpaceXの時価総額が現在1270億ドル~17兆円、公開時は30-50兆円と評価されているため[10]、 $\alpha=0.3-0.5$ である。

ここではこの両者の中間を採用し、 $\alpha=0.7$ とする。核融合発電のグローバル産業規模は、現在の電力市場からの推定で、将来(2040-50年頃)400-500兆円であり[11]、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%を適用すると、実質的な対象市場・産業規模は、120兆円 $\times 0.05=6$ 兆円となる。

したがって、 $V_{Exit} = \text{産業規模} \times \alpha = 6 \text{兆円} \times 0.7 = 4.2$ 兆円程度であろう。さらに、金融業界の通例として、上場時ディスカウントや資金調達株式希薄化効果を考慮し、20%割り引く。よって、上場時の企業価値は、概ね $V_{Exit} = 4.2 \text{兆円} \times 0.8 = 3.4$ 兆円と評価される。

4.2 リスクファクター、特に成功確率S

V_{Exit} を割り引いて V_{Entry} を求める際の割引率Rは、前述3.2節の視点①~④の検討結果で決まるが、ここではRに影響を与える決定的要素として、③のリアリティの一要素である「開発の期待成功率S」のみを考える。特に、(1)科学的PoC(核融合反応の実現)と(2)炉工学的PoC(エネルギーの取り出し)の2面で検討する(実際には、秘密保持契約書を締結し、様々な情報提供を受け、専門家へのヒアリング、調査検討を通じて総合判断するが、ここでは公開情報を基に、筆者の大まかな見立てを述べる)。

2章(A)「従来の主流方式の先進化」の場合、(1)の炉心プラズマの科学的PoC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実性が残る)。3大トカマクではほぼ臨界プラズマが達成され、CFSを考えた場合その出身母体MITのコンパクト強磁場トカマク Alcator C-Modで3.5 keVを達成しているからである。残るリスクは(2)の炉工学的面である。Alcator C-Mod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、高温超伝導の新材料フィルム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、熱と中性子からシールドすることは新たなチャレンジであろう。又、ブランケットのリチウム増倍と熱交換、第一壁の対中性子損傷対策、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[12]。コンパクト化により、材料にかかる負荷はITERよりも厳しい。特に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。したがって、総合的には決して簡単な開発ではないと思われ、30年代初

頭に商用炉に持ち込める成功確率は、一般的なベンチャー投資の成功率[7]と同様のS~1/3（3件に1件が成功する難度）程度と考える（楽観的にS~1/2の見方もあるだろう）。英国Tokamak Energyでは、CFSにやや遅れているので、S~1/4程度と見る。

逆に、2章(B)「シンプルな炉工によるトカマク代替方式」の場合は、Engineering Ready/Science Unprovenである。炉工システムについては、トカマクに比べ確立した（エンジニアリング・レディネスのある）技術を採用し、高難度の課題を閉じ込め方式によって回避し、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ことから依然大きい。したがって、全体ではS=1/10が出発点となろう。ただし個別には以下の違いがある。

- ・TAE, Helion, ZAP : S=1/5

炉心プラズマの臨界条件が、今後達成困難となるサイエンスリスクを、(I) スケーリングの達成度、(II) 達成までに予見されるハードルの困難さ、の2面から検討すると、(I) については、いずれも数世代にわたるスケールアップ実験を重ね（TAEは5世代、Helionは6世代、ZAPは3世代）、プラズマ温度で数keV、核融合3重積で 10^{18} keV秒 m^{-3} オーダー、即ち1980年頃のトカマク群（PLT, JFT-2等）のレベルに到達している。この次の世代のトカマクで90年代後半に科学的実証が成されていることを考慮し、一定の実績はあると見るべきだろう。一方、(II) の今後のハードルは、簡単なものではないであろう。TAEではビーム駆動FRCの定常運転を、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応の温度密度領域で、（理論的には証明されている）ドリフト不安定性を回避して行うことの実証が残っている。Helionでは、 $\text{D}\text{-}^3\text{He}$ 核融合及び、それによるプラズマ膨張による直接発電の実証が残っている。ZAPでは、達成済みのプラズマ電流500 kAを、臨界となる650 kAに今後増加させても、期待通りシアフローによってMHD不安定性が抑制されることの実証が残っている。以上より、Sは1/10よりは高いが、トカマク程進んではないため、S=1/5と考える。

- ・General Fusion: S=1/10（磁気ターゲット圧縮の要素技術はできたが、科学的PoCの統合試験はこれからのため）
- ・First Light Fusion: S=1/10（諸々の成果報告が未だ少ないため）

4.3 割引率Rと現在価値 V_{Entry} への割り戻し

Sが決まれば、期待ファンド倍率Aを指定して、Rが(5)式 $[R = (A/S)^{1/N} - 1]$ から一意に決まる。核融合ベンチャーへの長期(N=10年)、大型投資の場合、投資ファンドも大型・安定志向になるので、A=2倍程度であろう。この場合、割引率Rは以下となる。

- ・S= 1/3, 1/4, 1/5, 1/10 に応じて、
- ・R= 20%, 24%, 27%, 35%

このRを用い、式(3) $[V_{\text{Entry}} = V_{\text{Exit}} \times 1/(1+R)^N]$ に従って、 V_{Exit} (3.4兆円)を V_{Entry} に割り戻す。ここで「割引比」 $(1/(1+R)^N)$ は、Rの増加に従い1割前後まで小さくな

る(N=10年の場合、図3)。

結果、以下のような V_{Entry} を得る（ファンド期待倍率A=2の時）：

- (S, R, 割り戻し比, V_{Entry} の順に)
- ・1/3, 20%, 0.16, 0.55兆円 [(A) CFS]
- ・1/4, 24%, 0.12, 0.40兆円 [(A) Tokamak Energy]
- ・1/5, 27%, 0.10, 0.31兆円 [(B)TAE, Helion, ZAP]
- ・1/10, 35%, 0.05, 0.16兆円 [(B) General Fusion, First Light]

尚、以上のプロセスは確認のため行ったが、Rのモデル式(5) $[R = (A/S)^{1/N} - 1]$ を式(4) $[V_{\text{Entry}} = V_{\text{Exit}} \times 1/(1+R)^N]$ に代入すると、

$$V_{\text{Entry}} = V_{\text{Exit}} \times S/A \tag{7}$$

という式を得、実は簡単に計算（評価）できる。(7)式より、ファンド目標倍率(A)を所与とすれば「成功確率(S)の見立て」が現在価値評価に直結する」ことを示している。

4.4 VCの巨額投資の回収の考え方：

さて、ここで本稿の問題意識である「VCの核融合ベンチャーへの巨額投資は、どのように説明されるのか？」を考える。そのために、図4で、各社の資金調達額(累積) (▼)と前節で行ったバリュエーション評価値 (●, 線幅はエラーバー)を示す。

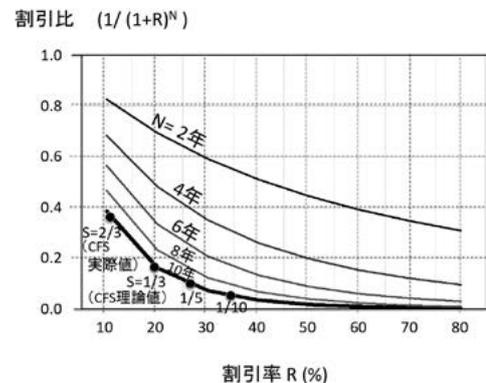


図3 割引比の割引率R依存性。

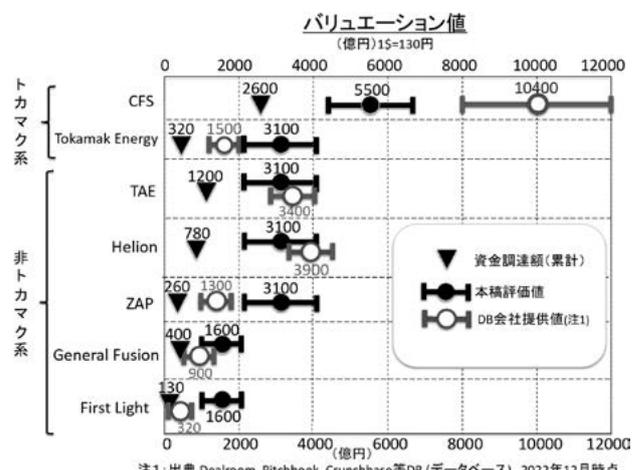


図4 主要核融合ベンチャーの資金調達額、バリュエーションの本稿評価値とDB会社提供値の比較。

例えば、Helionでは、資金調達額780億円に対し、バリュエーション V_{Entry} は3100億円であり、前者の后者への割合(約1/4)は、投資家VC勢の株式保有シェアに概ね相当し、経営上は妥当である。 V_{Entry} 3100億円は、10年後に V_{Exit} 3.4兆円(4.1節)と約11倍になると期待される。実際には、次期実験炉の開発結果が良好ならば、途中で(例、5年後)、発電デモ炉開発のために資金調達を行い、新規投資家が参加するため、それに参加しない場合は、既存投資家のシェア(1/4)は希釈化されて減る(例、約1/5)(実際には、その時の必要資金調達額とバリュエーションに依存する)。したがって、VC目線では、EntryからExitに向けて、全体バリュエーションは11倍、株式保有シェアは4/5倍(1/4から1/5へ)となり、保有株式価値(積)は8.8倍である。つまり、計画通り進めば、十分大きなリターンで投資回収できる。これは、市場や V_{Exit} が大きいことと、リスクを見込んで、 V_{Entry} を十分大きくディスカウントしているためである。勿論、逆に開発が計画通り進まなければ、株式上場まで行かず、安く企業や他のファンに株式を売却し、最悪損失となる。

他社の例でも、概ね資金調達額、即ち株式の投資家によるシェアは、バリュエーションに対して、1/10~1/2であり(VC目線では大きい程良い)、エラーバーを考えると妥当であろう。

以上は理論値的な概算評価であるが、参考までに、実際のバリュエーションを、ベンチャーのデータベース(DB)会社による値[13]で見よう。ただし、実際の値と、DB会社による推定が混在していて峻別不可能なため、ここでは「DB会社提供値」と呼ぶ、この値を図4の○で示す。TAE, Helion, General Fusionで、本稿評価値とDB会社提供値は、概ねエラーバーの範囲内で合致する。しかしCFSでは、DB会社提供値は本稿評価値に対し概ね2倍、Tokamak Energy, ZAPでは1/2、First Lightでは1/5である。

仮にCFSのバリュエーションが現実では過大評価されている場合、その理由は第1に、機関投資家の投資方針の環境問題解決へのシフトであろう。第2に、リード投資家のファンド規模の大きさである。Tiger Global Managementは17兆円、Temasek(シンガポールの官民ファンド)は38兆円という巨額資金を運用する総合ファンドであり、VCだけでなく、より大型投資を行うPE(Private Equity)ファンドも合わせて運用している。第3に、世界的一流研究機関(MIT)への信頼・期待、及びMITの高い交渉力である。第4に、ハードウェア開発のリスクの過小評価もあろう。

尚、実際の投資では、バリュエーション評価はあくまで一部であり、他の市場性、競合優位性、経営力・実行力、インパクト・意義を総合的に考慮して判断する。したがって、VCが上記の理由から、投資対象をゼロカーボンのための戦略的投資案件として位置づけ、高いバリュエーションを例外的に受け入れたこともあり得る。この場合、利益をあまり期待せず、投資元本回収で良しとし、成功するまで強い意図で資金支援する考えであろう。

又、DB会社提供値のバリュエーションが過小評価のケースがみられるが、その原因は、Tokamak Energy社の場合は、英国におけるVC層の薄さとベンチャー立ち上げの遅れ、ZAP, First Lightの場合は、科学的蓄積の少なさであろう。本来もっと高く評価されるべきかもしれない。

5. 総括

・VC投資の経済合理性・折り合い

本稿では、VCによる近年の欧米核融合ベンチャーへの巨額投資(数千億円)は経済的に妥当か、検討の考え方を紹介した。要は、逆算で考え、(1)数百兆円の巨大安定的な世界電力市場が見込まれ、(2)ゼロカーボンに貢献する新技術ベンチャーの上場には大きな経済価値がつき(数兆円)、(3)その上場経済価値を、リスクに見合った割引率でディスカウントして現在価値を評価し、(4)その現在価値が適切で(安く)、適切な(多くの)株式保有シェアを得られれば、投資に値する、というものである。リスク見合いの上昇価値が見込めるからである。

逆に今後は、数年後、実験炉の成果が出れば、バリュエーションを上げ、原型炉のための開発費を資金調達する(おそらく数千億円)。その結果、既存投資家の保有シェアは低下するが、それ以上に保有価値は増加し、原型炉開発もうまく進めば、バリュエーションはさらに上がり、2030年代に株式を上場し、投資家は株を売却しリターンを得る、というシナリオが期待される。勿論計画通りに行かず、損失に終わる場合もあり得る。

以上のように、研究から社会実業への相変化の境界でVC投資と巨大応用科学の折り合いがつくわけである。

・VCの核融合開発・アカデミアへの意味合い：

近年多数の核融合ベンチャーが生まれ、VCから多額の投資が行われたことは、核融合のR&Dの質的な変化を意味する。

特に、2050年ゼロカーボンの目標に向けて、早期実用化開発の重要性が増したが、その肝はスピードだけでなく、「ディスラプティブ・イノベーション」となるアイデアと技術である。実用化にITERと原型炉で合計30年3~5兆円かかるのであれば、ベンチャーには、短期間(1/2の15年)、安価(一桁小さい数千億円)でできるアイデアが期待される。もちろん、一定のリアリティが必要である。ベンチャーがVCを説得できれば、且つVCに目利き力・挑戦マインド・資金力があれば、資金調達も可能となろう。これまで、数の面ではトカマク以外のベンチャーが多いが、それは彼らがディスラプティブでゲームチェンジャーの特徴を打ち出し、ハイリスクハイリターンを狙うVCと共鳴したからであろう。

レーザー、ヘリカル系では、大型資金調達を行ったベンチャーは未だないが、トカマクベンチャーCFSが既に存在するので、商用炉としてCFSを大幅に超える魅力を打ち出す必要がある。

又、研究開発予算の流れが、従来の「国→アカデミア」だけでなく、MITとCFSの関係に見られるように「VC→

ベンチャー→アカデミア」というスキームが生まれたことも重要である。ベンチャーでの核融合開発では、自力では解決できず、アカデミアでしかできない課題解決テーマもあろうから、研究課題が、研究者の知的好奇心から生まれる場合とは別に、ベンチャーによって特定されるという、実学的、即ち「工学が実用化によって鍛えられる」面が増えよう。

したがって、アカデミアへの示唆として、(I) 実用化とは逆に、次世代核融合や、個人の興味・発想主体の基礎研究の重要性が増すと同時に、(II) 実用化の波を捉え、革新的な実用炉のアイデアを考案し、ベンチャーを立ち上げ、投資家を説得して資金を得、アカデミアは難関研究テーマを受託し側面支援する、というスキームも重要となろう。既にベンチャーの先行例が多いので、相当斬新なアイデアが必要だろう。アイデア検討段階ではARPA-Eのような国の支援も必要かもしれない。又、出資者を募るために、VCだけでなく、関連業界も巻き込み、グローバルに対応することが有効だろう。

尚、ベンチャーエコシステムにおける「機関投資家からVCへの資金供給の増加」は重要だが、過大な供給は、逆にエコシステムをスポイルしかねない。プロとしてのVCの目利きの質と、ベンチャーの戦略の質の双方が必要不可欠である。つまり、質と量のバランスある発展、及び金融サイドと技術サイドの相互理解が重要である。

最後に

本稿では、VC投資の経済学的な側面を紹介した。核融合研究界と金融業界の相互理解に資すれば幸いである。尚、経済的検討は必要だが、最も重要なことは、革新的な技術、事業アイデア、知見、実行力そのものであることに変わりはない。

謝辞

永田正義氏（兵庫県立大）からのコメントと情報提供が参考になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

[1] Fusion Industry Association, The global fusion industry report in 2022, (2022).
 [2] 「企業による核融合研究の最近の動向」：プラズマ・核融合学会誌 93, 18 (2017).
 [3] 永田正義、神吉隆司：プラズマ・核融合学会誌 93, 563 (2017).
 [4] 「核融合スタートアップ創業者による座談会（前編）」：プラズマ・核融合学会誌 98, 273 (2022).

[5] C.L. Neil *et al.*, J. Fusion Energy 38, 506 (2019).
 [6] D. Jassby, APS, April 2019 Newsletter, 13-16 (2019)
 [7] 後藤直義, フィル・ウィックハム：ベンチャー・キャピタリスト, 73 (ニューズピックス出版, 2022).
 [8] W. Sahlman, A Method for Valuing High-Risk, Long-Term Investments, Harvard Business School, 1987, 9-288-006.
 [9] <https://www.bloomberg.co.jp/quote/TSLA:US Market Cap>
 [10] <https://news.crunchbase.com/transportation/elon-musk-spacex-valuation/>
 [11] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/energy-resources/Deloitte-Power-Market-Study-2030-EN.pdf>
 [12] W. Nuttall, D. Webbewood, S. Konishi, S. Takeda, Commercializing Fusion Energy, IOP, 2021.
 [13] Dealroom.com, Crunchbase, CFS Pre-Money Valuation, <https://www.crunchbase.com>

付 録 割引率Rのモデル化

設立時の期待ファンド倍率Aは、投資数n, 総リターンQ, 各案件リターン Q_n , 総投資額I, 各案件投資額 I_n の時、

$$A = Q/I, Q = \sum_n Q_n, I = \sum_n I_n$$

である。割引率Rは収益率と同等なので、案件成功率は案件によらず成功率Sと仮定すると、投資後N年後の Q_n は以下と表せる。

$$Q_n = I_n \times (1+R)^N \times S$$

ここで、シンプルモデルとして、各案件投資額は等しく、追加投資は行わない、又リターン Q_n を、成功案件では等しく上記で表され、不成功ではゼロと扱うとする(図5)。この場合、Aの計算からRは以下と表される：

$$A = \sum_n [I_n \times (1+R)^N \times S] / \sum_n I_n = (1+R)^N \times S$$

$$\therefore R = (A/S)^{1/N} - 1$$

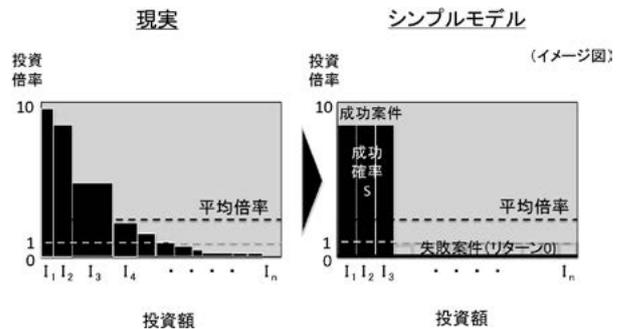


図5 投資ポートフォリオのモデル化。