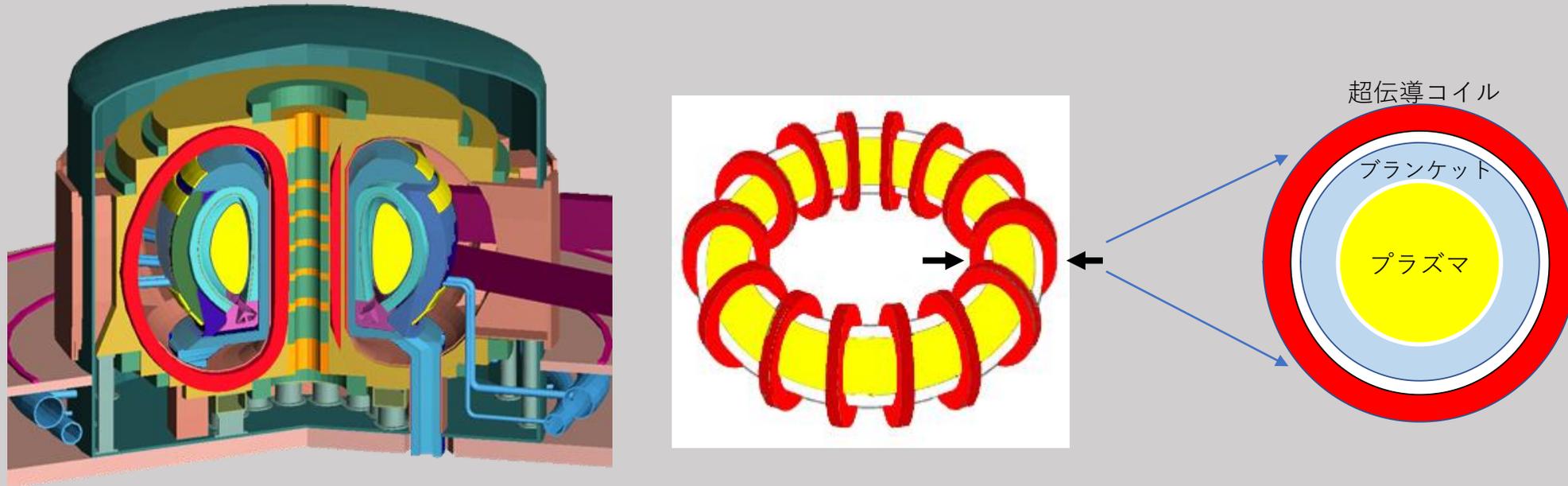


10年後に実用化って本当なの？

1. ITERが進む中、なぜベンチャーがもてはやされているのか。
2. ベンチャーは独自の炉方式、独自の技術があるから注目されているのか。
ITERに先行することがありえるのか。
3. 先進燃料炉の実現見通しありは本当か

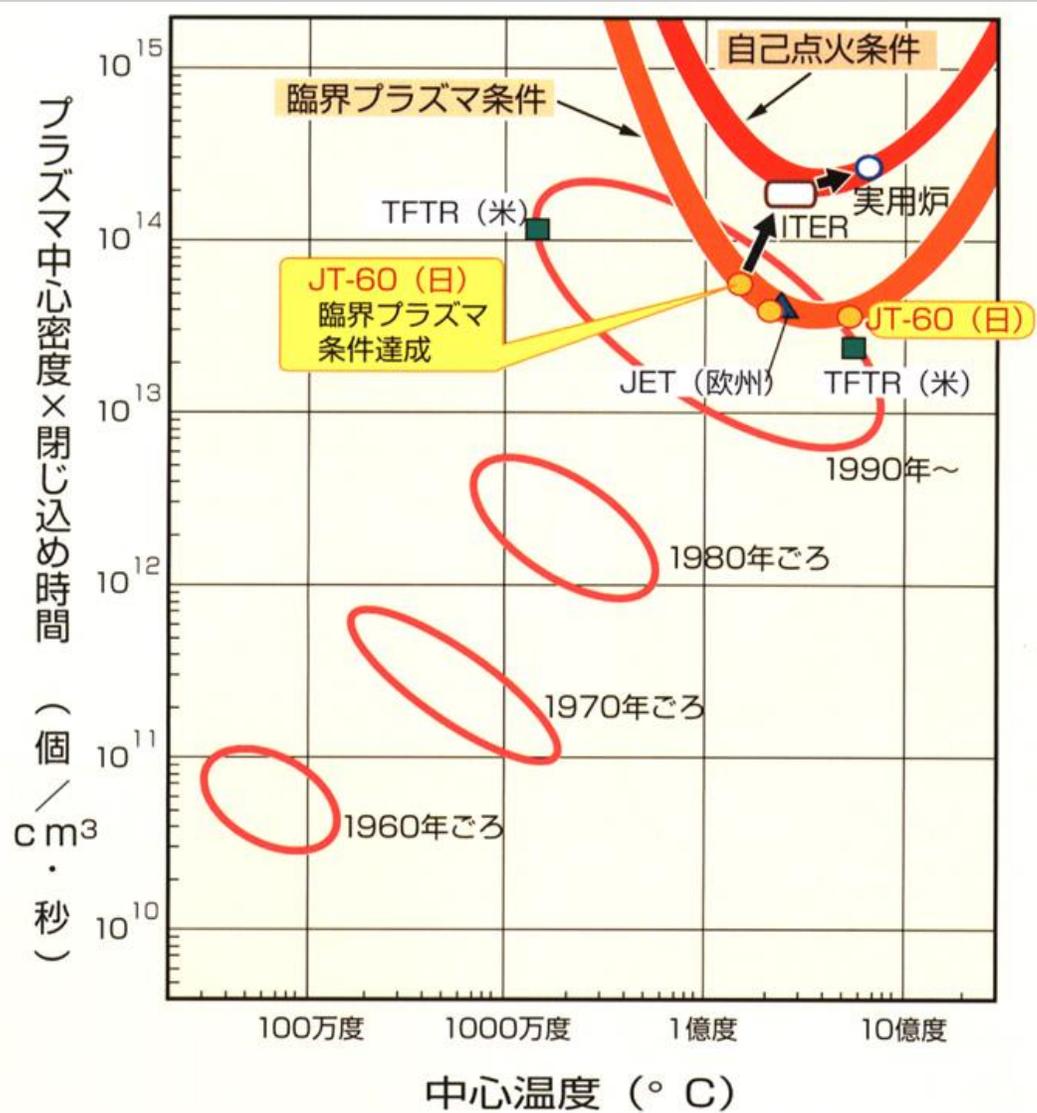
1) 磁場方式核融合炉の構造



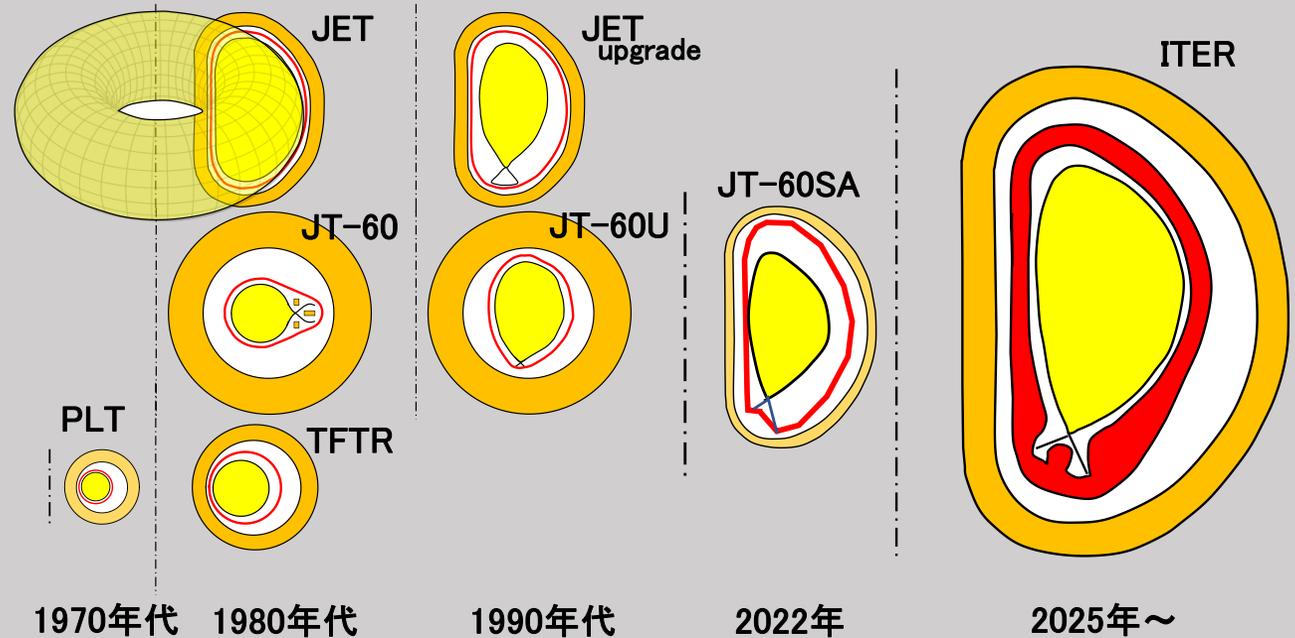
超伝導コイルで作った磁場で**プラズマ**を閉じ込める。
フュージョンエネルギーを
プラズマを取り囲む**ブランケット**で受け止める。

2) 過去の歴史と日本のJT-60SA

10年で一桁ずつ、温度（横軸）と密度（縦軸）が向上してきた



日本のJT-60Uと欧州JETは、1991年に、**臨界プラズマ条件**（加熱に使ったパワーと出力が同じ）を達成。 $Q (= \text{入力}/\text{出力}) = 1$



米国のTFTRは $Q=1$ 達成に失敗（最高 $Q=0.3$ だった）。小型に作り過ぎたのが原因。この敗北で、TFTRは廃炉になり、米国の磁場方式開発は、その後、ずっと低迷。

米、英の事情

米国は強磁場・小型のTFTR（3大トカマクで磁場最強、大きさ最小）で $Q=1$ 達成に失敗。TFTRの廃炉後、大型トカマクは米国にない。国内の磁場方式研究活性化のために、強磁場トカマク研究の意義を説明する必要があった。

英国はJETの後継を作りたかったが、後継機は日欧でJT-60SAに統合された。ITERも仏にある。そこで英国に作ったのが球状トカマク。その将来性を説明する必要があった。
(⇒再び英国を偉大に)

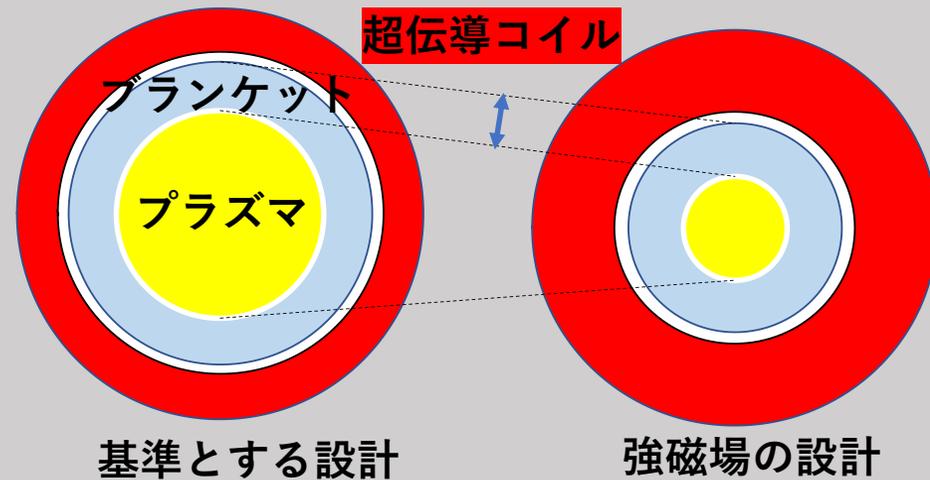
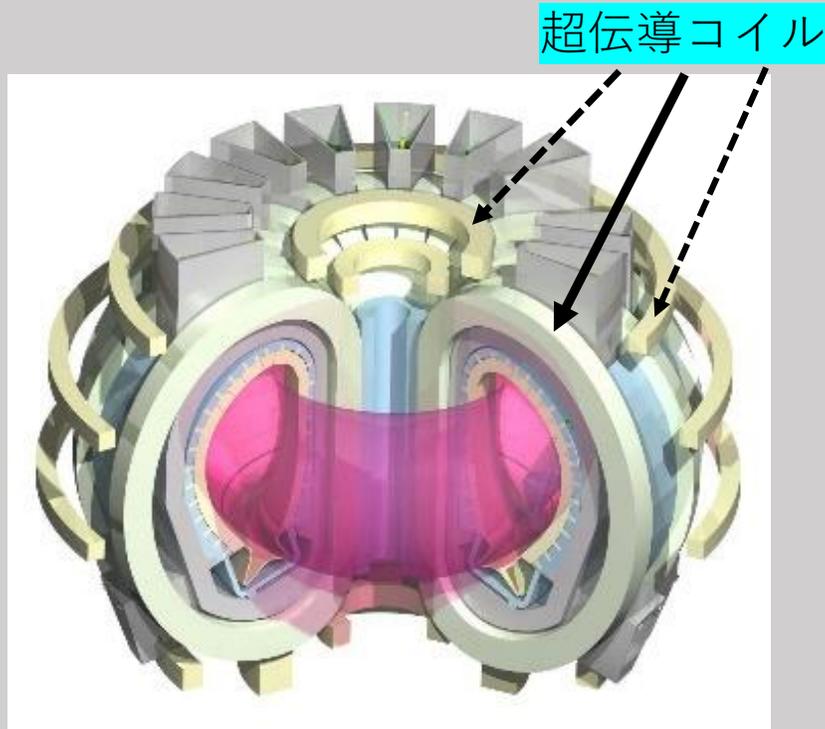
日本は核融合では勝ち組で、このような事情はない。
7章、8章で紹介した通り、世界でもっとも多くの核融合炉の概念設計を経験した知見もある。

(高温超電導の強磁場炉、球状トカマク炉、レーザー炉なども含む。)

3) 超伝導コイル

高温超伝導

開発が間に合えば使うが、現状は信頼性の視点で原型炉に使える段階にはない。高温超伝導線は強磁場が出せるが、高強度の構造材がなければ、コイルがどんどん太くなり、あまり小型にならない。ブランケットは薄くできない点も忘れがち。



図は量子科学技術研究開発機構提供

3) 超伝導コイル

ニオブスズ導体

ITER以前は、大型コイルといえばニオブチタン。10Tを超える強磁場が可能なニオブスズの実用化は、大きなイノベーションだった。



次は、強磁場の高温超伝導？

・・・ではない

コイルが太くなり小型にはならない (右下図)

磁場強度は支持構造材で決まっている。
同じ強度の材料だと磁場強度の二乗で太くなる。

高温の恩恵にはあずかれない

温度が高いと金属強度が落ちるので、
高温超電導線であっても、金属強度を最大にするため
ヘリウム冷却の -270°C で使うしかない。

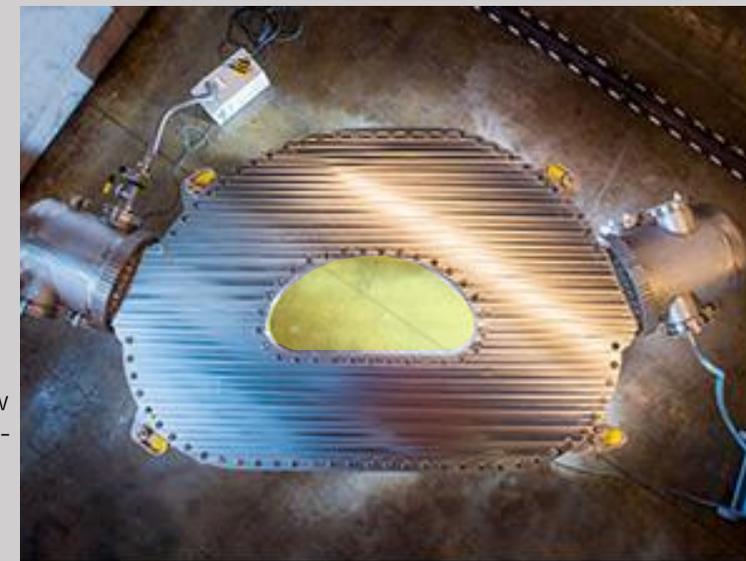
強磁場化には**極低温用の高強度金属**がまず必要

ITERの11.8T
D型コイル



写真はITER機構提供

MIT開発の
高温超電導20T
D型コイル



<https://www.psfc.mit.edu/news/2022/mit-expands-research-collaboration-with-commonwealth-fusion-systems-to-build-net-energy>

4) 米英ベンチャーの小型炉案 棚上げされた課題は何か

①強磁場コイルの小型炉 (米国MIT関連ベンチャー SPARK)



<https://www.psfc.mit.edu/sparc>

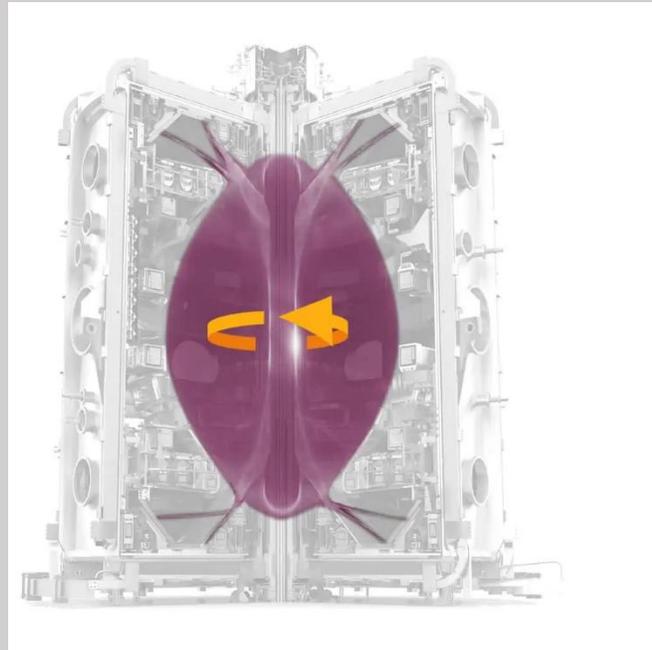
米国内の磁場核融合研究の活性化のために登場したのが高温超電導が売りのMITの強磁場炉SPARK。世界で最初に発電するという米国らしいふれこみだが、概念図では、**三重水素を増殖するブランケットと遮蔽がない**。超伝導コイルは短期間で中性子で壊れるだろうが、DT燃焼を短期間やって、発電出来たら成功として、すぐに終わる計画であろう。

核融合自己加熱での燃焼維持ではないので、燃焼プラズマの開発にはならない。ブランケットをはじめとした工学開発にも役に立たない。結局、ITERに加え、すべての要素技術を備えた大型原型炉が必要。世論高揚には、**取りあえず発電だけ**するのも戦略としてはありえるが、可能なら原型炉直行のほうが実用化は早いのではないか。

4) 米英ベンチャーの小型炉案

棚上げされた課題は何か

② 球状トカマクの小型炉 (英国)



MUST upgrade
 $R=0.85\text{m}$, $a=0.65\text{m}$
 $R/a=1.3$

球状トカマクについては次ページ

英国は自国での球状トカマクMUSTがあるので、「球状トカマクの小型炉」をITERとは別に掲げている。

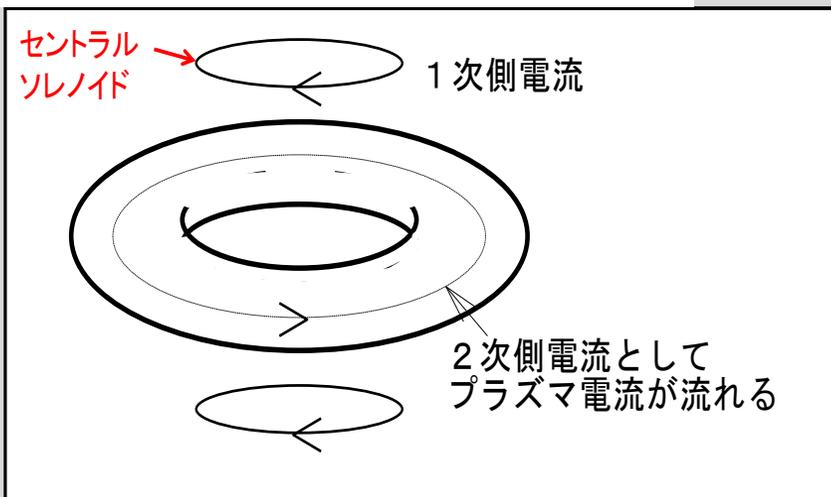
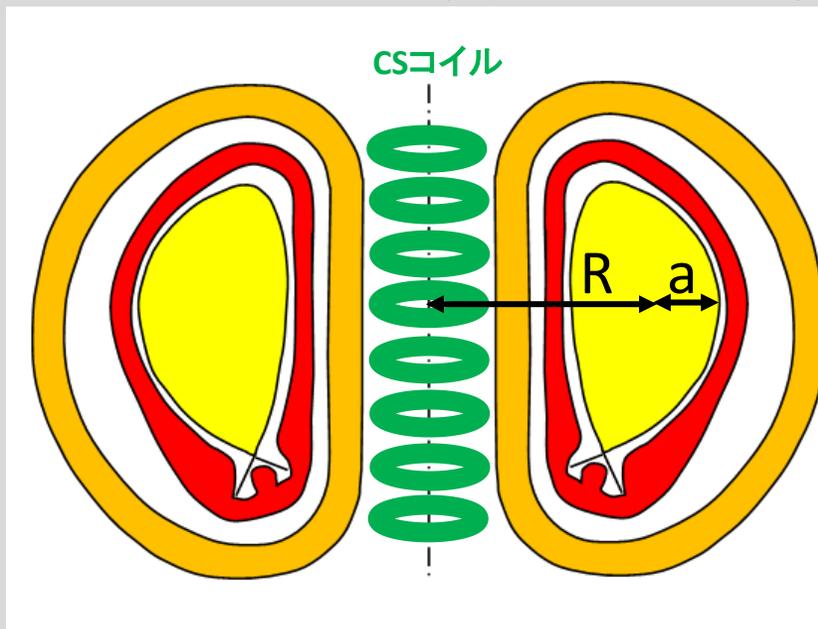
「再び英国を偉大に」が合言葉だが、「非常にチャレンジング」とも繰り返していることと、実用化をベンチャーに任す点から見て、早期実現可能と、本当は思っていないのではないかと私は感じる。球状トカマクもトカマクなので、次の原型炉がトカマクでも研究は生きる。

4) 米英ベンチャーの小型炉案

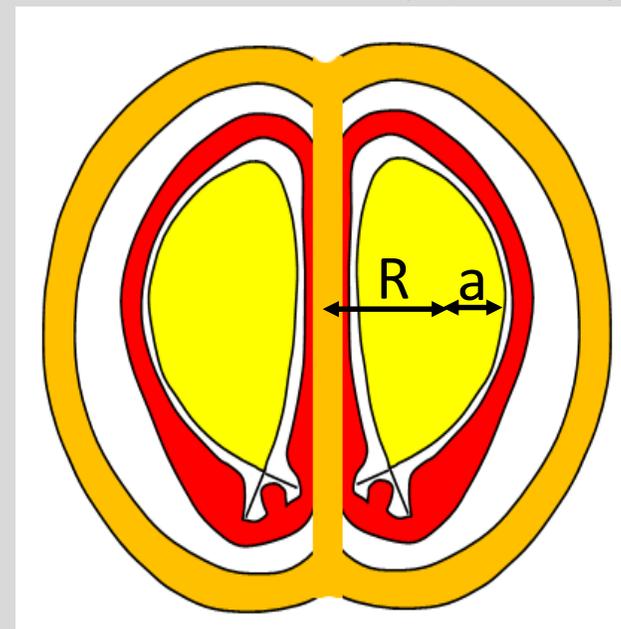
棚上げされた課題は何か

③ 球状トカマクとはなにか

@通常トカマク ($R/a=3.4$ ITER)



@球状トカマク ($R/a \ll 3$)



- 理論上、プラズマ圧力が高いが、小型化すると
 - ×壁が熱的に持たない
 - ×ブランケットが熱・中性子で持たない
 - ×CSコイルが置けない(電流が起動できないリスク)
 - ×中央のコイルの遮蔽ができない
 - ×中央側には増殖ブランケットが置けない
- 日本は、VECTOR($R/a=2.3$)、SlimCS(2.6)などの炉設計を通して、原型炉には採用できないと結論した。

4) 米英ベンチャーの小型炉案 棚上げされた課題は何か

- ④民間活力（ベンチャー）を利用するのは重要
でも、国立研でやらないのには、もう一つ理由があるように思える

米国 証券民事訴訟改革法 PSLRA法とは

1995年に承認された証券民事訴訟改革法 (Private Securities Litigation Reform Act) で、そのポイントは、企業が予測した将来情報が大きく間違ってしまうリスクを投資家に警告している限り、将来情報を提示する会社は証券訴訟から守られる、という点にある。

http://hephaistos.fc2web.com/tips/us_disclosure.html

- 開示内容が故意の嘘でない限り、失敗しても民事責任は免除される。
- 無謀な計画と知っていても、「できる可能性もあったと思っていました」と言っていれば処罰されない。

⇒ ロッキードマーチン、小型核融合炉10年以内(2014年のニュース)

ロイター <https://jp.reuters.com/article/lockheed-fusion-idJPKCN0I509K20141016>

実現できないのは明らかになったが、だれかが責任をとった様子はない。

4) 米英ベンチャーの小型炉案 棚上げされた課題は何か

⑤ベンチャーの主張がおかしいと指摘できない理由は？

「10年後に核融合は嘘をついたといわれる」という心配の声は多数あるが、声をあげられない理由は：

●ベンチャーは「**企業秘密**」として、重要な点を発表しないため、学会などの議論の場に乗ってこない。

●ベンチャーは**PSLRA法**に沿って、寄付を集めている。
これは違法ではなく、正当な営業活動である。

●企業として資金を集めているのに対し、「こんなものはできない」と断言したら、それが科学的に99.99%正しくても、**営業妨害**で個人が告訴される恐れがある。

●寄付する方々は、大金持ちで、「未来エネルギーに寄付した」という名誉だけで十分なりターンなので、実現しなくても文句は言わないし、仮に言っても罪に問えない。

結果、核融合関係者の発言は、「もし実現すれば有意義だが、非常に難しいとは思いう」とまでしか言えず、多くの人を惑わす事態になっている（と私は思う）。
すべて発表側の責任であり、報道側の責任ではない。

4) 先進燃料フュージョン炉 実現には高いハードルがある

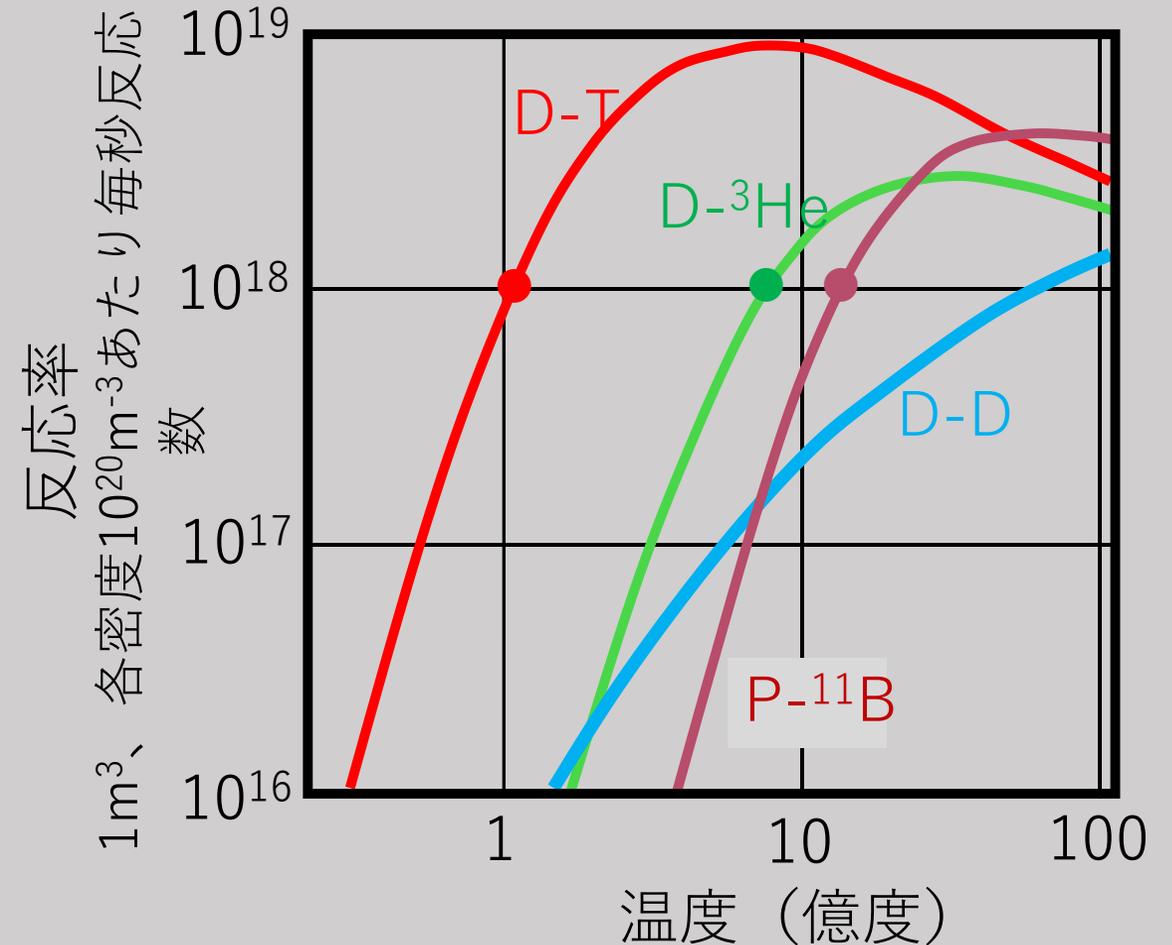
- ①ヘリウム反応炉：5億度、仮にできて燃料は月面から運ぶ
- ②ボロン反応炉：15億度、放熱が核融合発熱を上回るので現在技術の延長上でない

①D-³He反応炉

(非放射性燃料、並行で起こるDD反応が中性子発生)

5億度は難しいが、現在の核融合装置が、もし超高性能になれば実現はする。

しかし、燃料の**ヘリウム3は、地上になく、月面に**採掘施設を作って地上にロケットで輸送ということになる。地上のDD炉やDT炉で³Heを作るのは、早期実現と自己矛盾。



先進燃料核融合研究の現状と展開、プラズマ・核融合学会誌、Vol.98 No.2 (2022) を参考に筆者岡野が作成。

4) 先進燃料フュージョン炉 実現には高いハードルがある

- ①ヘリウム反応炉：5億度、仮にできて燃料は月面から運ぶ
- ②ボロン反応炉：15億度、放熱が核融合発熱を上回るので現在技術の延長上でない

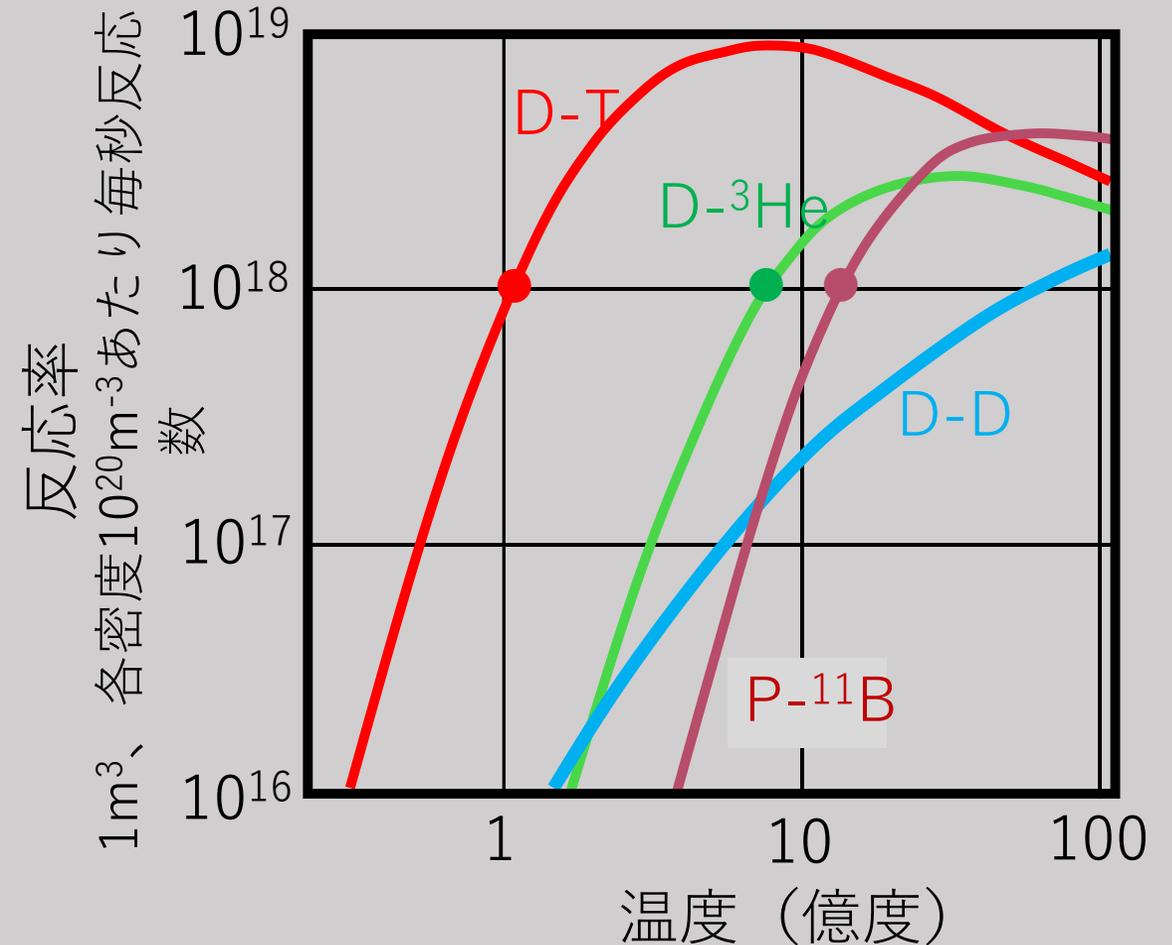
②P-¹¹B反応炉

(中性子が出ない=放射性廃棄物なし)
理想のフュージョン炉だが・・・

水素とボロンの反応。15億度を要する。

15億度のプラズマから**放射で逃げる熱は、フュージョンで出る熱より大きい**ことが証明されているので、現在の装置（磁場・レーザー）を、いかに超高性能化しても、炉はできない。

フュージョン反応は起きるが、放射は少ないという**未知の大発明が必須**。



先進燃料核融合研究の現状と展開、プラズマ・核融合学会誌、Vol.98 No.2 (2022) を参考に筆者岡野が作成。

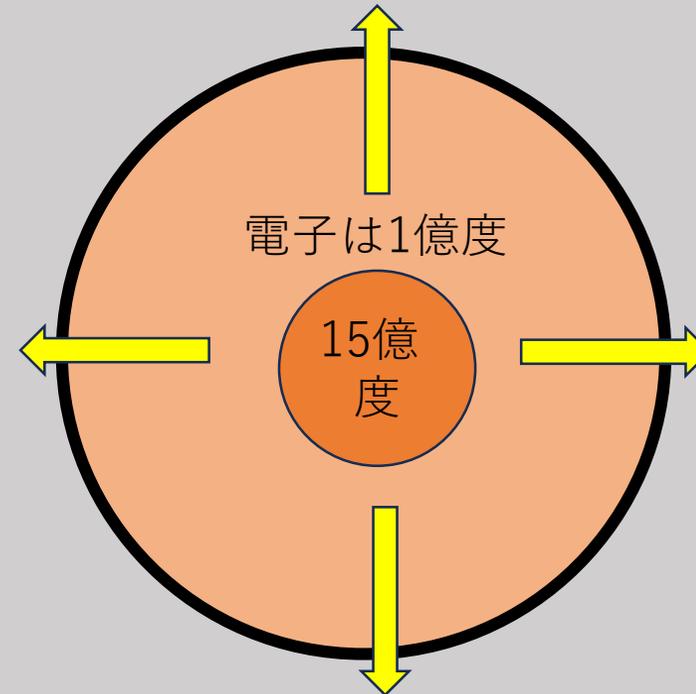
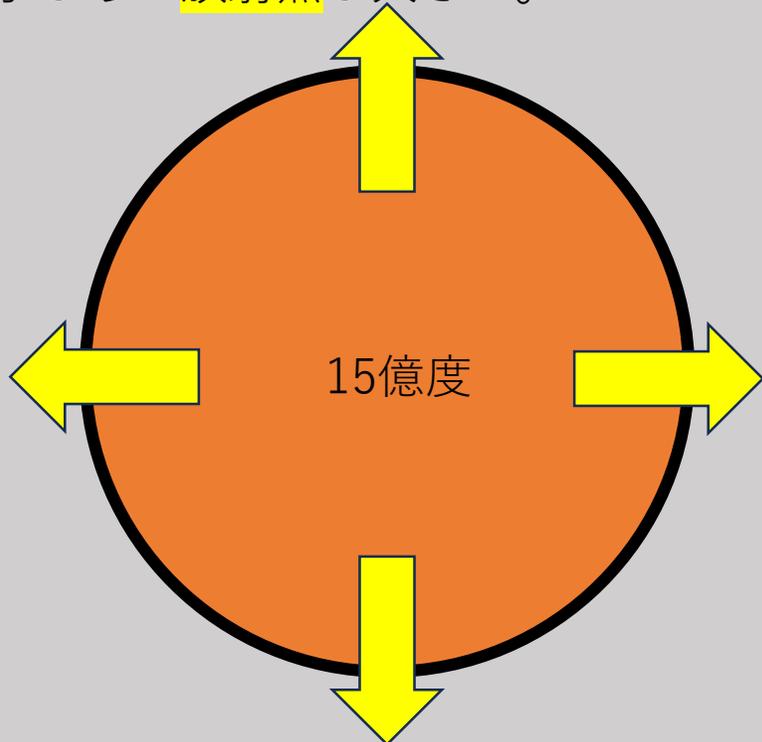
4) 先進燃料フュージョン炉 実現には高いハードルがある

- ①ヘリウム反応炉：5億度、仮にできても燃料は月面から運ぶ
- ②ボロン反応炉：15億度、放熱が核融合発熱を上回るので現在技術の延長上にはない

②P-¹¹B反応炉 補足

普通のプラズマは内部衝突で平均化されているので（熱平衡）、内部の粒子衝突でエネルギーを失わない。ゆえに、その衝突のうち、わずかな確率で核融合が起こればOK。ただし、電子からの放射熱が大きい。

イオンは高温、電子は低温（非熱平衡）にできる方法をなにか発明すれば、放射熱は少なくできる。しかし、この非熱平衡状態の維持は非常に効率が悪く、核融合ゲインは最大でも1を超えるかもしれない程度。



1. ITERが進む中、なぜベンチャーがもてはやされているのか。

合法的な資金集めで研究も真剣にやっているので止めることはできない。核融合はスペースXの段階ではなく、アポロやスペースシャトルの段階なのが、一般には理解されていないため、民間、ベンチャーというキーワードが受けてしまう。

2. ベンチャーは独自の炉方式、あるいはトカマクでも独自の技術があるから注目されているのか。ITERに先行することがありえるのか。

私には過去の焼き直しにしか見えない。不都合部分は企業秘密として隠しているように私は感じる。炉工学開発まで含めてITERに先行できる可能性はないと私は思うが、「約束通り電気はちょっと出ました」とだけ言える可能性ならある。

IT長者でなく、ものづくりのプロ、イーロンマスクは「FusionXで即実現」と言っていないのにも注目。

2. 先進燃料炉の実現見通しありは本当か

触れられていない決定的な問題点があり、それらの見通しはまだないと私は思う。