

核融合エネルギー基礎論

エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻

先進エネルギー評価論

地球環境学舎サステナビリティ学コース

未来エネルギーシステム技術と持続可能な世界
—革新エネルギー、核融合、地球環境、水素社会
その技術と経済、社会への適合—

3. 核融合入門：原理と特徴

(15:00-16305) 4/26

2021. 前期 月曜 4限 web配信

京都大学エネルギー理工学研究所・エネルギー科学研究科
小西哲之・八木重郎

内容

1. 未来のエネルギーと環境

- ① エネルギー問題
- ② 地球環境問題
- ③ 未来エネルギーの考え方
- ④ なぜ核融合を研究するのか？
- ⑤ メタ評価とは何か？

2. 核融合入門

- ① 原理と特徴
- ② 開発の現状

3. 核融合エネルギー変換と炉設計

- ① トカマク炉設計
- ② エネルギープラント

4. 核融合工学

- ① 基本的な工学
- ② 核融合炉の構成機器
- ③ 工学研究の現状
- ④ 技術課題とトピック

5. 安全性

- ① 安全性の考え方
- ② 動力プラント安全
- ③ 廃棄物と材料
- ④ トリチウム、環境、生物
- ⑤ ベイズ理論
- ⑥ 安全保障

Physics Today, vol.55, No.4 (2002)



内容 2



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

6. 先進エネルギー変換

- ① サプライチェーン
- ② 核融合ブランケット工学

7. 未来エネルギーと水素

- ① 未来型エネルギーシステム
- ② 水素製造と利用
- ③ 二酸化炭素排出とCCS

8. 核エネルギーの利用

- ① 核融合と核分裂
- ② 核エネルギーによる水素製造
- ③ 水素製造とエネルギー源
- ④ エネルギーと水素社会

9. エネルギー研究と社会

- ① 研究開発と社会
- ② 経済効果と市場性
- ③ 外部性の概念
- ④ 知的財産権と起業

10. 未来エネルギーと人類社会

- ① エネルギー開発戦略
- ② 未来のエネルギー市場
- ③ 環境対策とエネルギー
- ④ 社会への適合
- ⑤ 人類の持続可能性問題

0. 連絡事項

1. 講義資料

- ・PandA で配信しています。ダウンロード可。
 - ・録画をストリーミング配信しています。
- 受講者のみ視聴可能、ダウンロードはできません。
欠席者以外も、もちろん閲覧可能です。

2. 本講義の進め方（再掲）

- ・成績は出席および小テストでつけます。
- ・Zoom視聴は、なるべく大画面で、資料見ながらがいいです。
携帯はやむを得ない場合に限ってください。
- ・欠席者は、事前にメールで通知、上記資料及びストリーミングで自習し、課題をレポートとして提出すること。
- ・提出は可能な限りPandAで。仕方なければメール。
期限 次の授業当日13:00。
- ・履修登録、だいじょうぶですね？

参考図書：「エネルギー問題の誤解 いまそれをとく」

小西哲之 化学同人社(2013) ¥1890

978-4759813548

前回の課題1「エネルギーにいくら払ってる？」の答え

① とりあえず「あてずっぽ」でいいです。

④ 自分の払っているエネルギー代金、調べておくこと。
電気、ガスの料金体系はどのようになっているか？
→ 自分で確認してください。

② 日本の国全体として、すべてが輸入の石油、天然ガスだとしたら？
毎年いくら払っている？（こういう時政府統計は役に立つ）
→ だいたい10兆円くらい。原油価格下落が影響、量も若干減少。
原油は2014年で160億ドル。天然ガス75億ドル。合計で大体30兆。
輸入依存率88%。多いとき（2013ころ）は**輸入総額の1/3払った！**

生活費の3割、光熱費に払える??

③ 日本のGDP, 国家予算は毎年いくら？

→ だいたい500兆円、100兆円くらい。（毎年最大を更新）
（これも、一応知ってないと「知的な専門家」とは言えん数字。）

➡ 要するに、この国のオサイフで、光熱費をこんなに払ってるって問題

我が国のエネルギー供給体制の根本的な脆弱性

【エネルギー基本計画】

我が国は、エネルギー源の中心となっている化石燃料に乏しく、その大半を海外からの輸入に頼るという根本的な脆弱性を抱えており、エネルギーを巡る国内外の状況の変化に大きな影響を受けやすい構造を有している。

国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーの安定的確保は、国の安全保障にとって不可欠なものであり、我が国にとって常に大きな課題であり続けている。

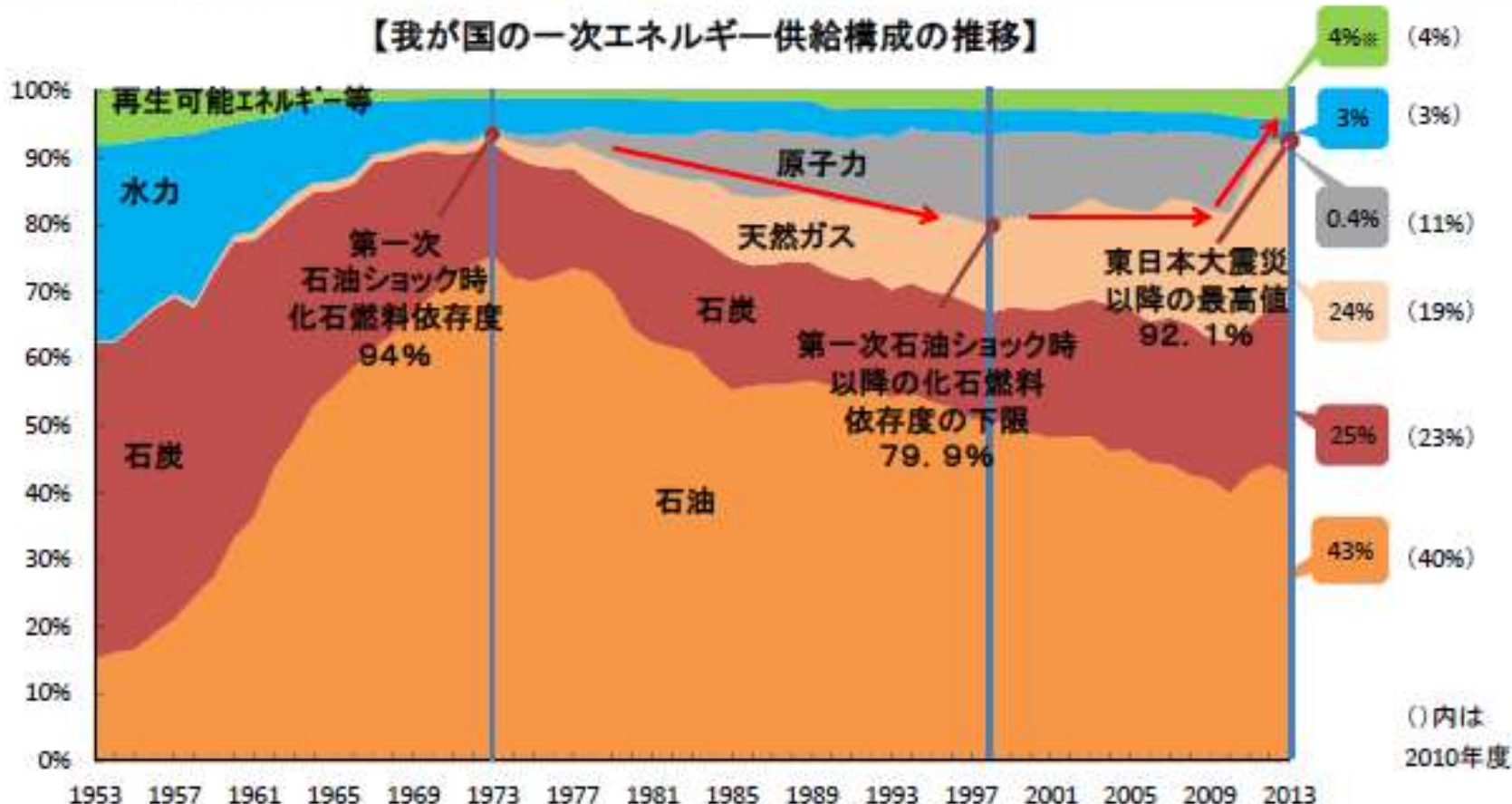
～はじめに～

この国の政府は、安定確保と供給を第一に考えている。

一次エネルギー供給構成に占める化石燃料依存度

- 我が国はエネルギー源のほとんどを海外からの輸入に依存。
- オイルショック等を踏まえ、省エネ対策強化に加え、再エネ・原子力発電等を進め、供給構造を転換させていくことにより、化石燃料依存度の低減の努力を重ねてきたが、東日本大震災以降、原子力発電所の停止の影響により、オイルショック時に迫る状況にある。

【我が国の一次エネルギー供給構成の推移】



【出典】総合エネルギー統計

※再生可能エネルギー等の内訳は、太陽光(0.1%)、風力(0.2%)、地熱(0.1%)、バイオマス等(3.6%)。

【エネルギー基本計画】

エネルギー政策の要諦は、安全性(Safety)を前提とした上で、エネルギーの安定供給(Energy Security)を第一とし、経済効率性の向上(Economic Efficiency)による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合(Environment)を図るため、最大限の取組を行うことである。

～第2章第1節1. (1)エネルギー政策の基本視点(3E+S)～

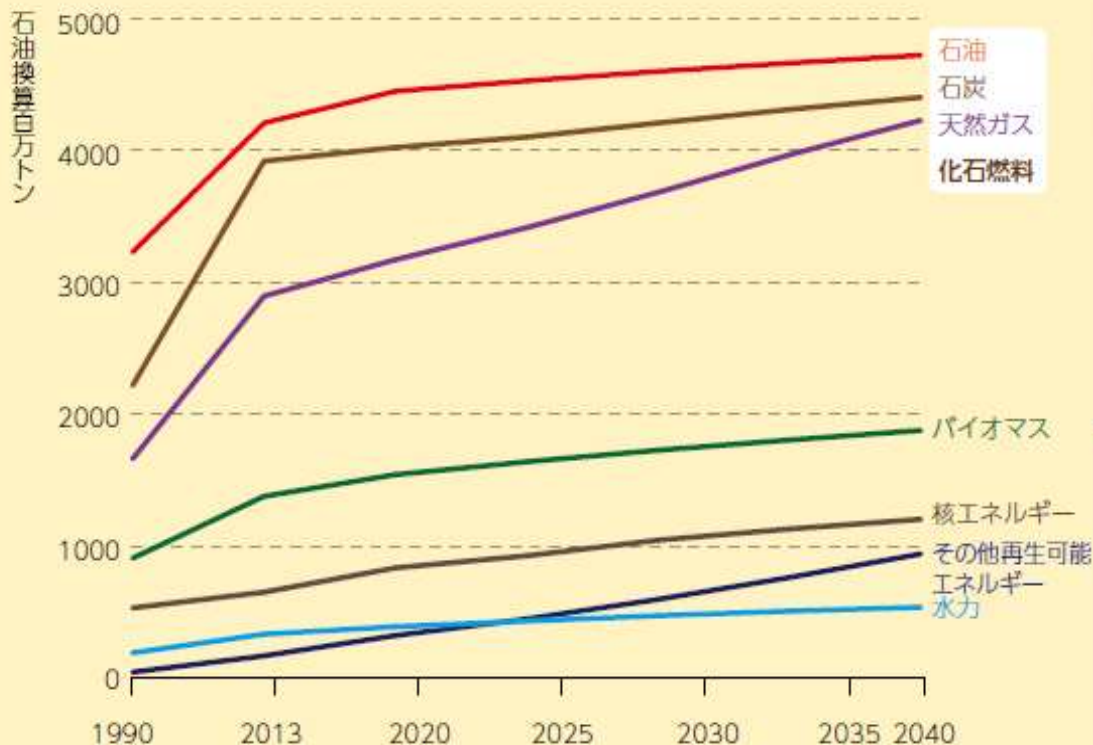
危機時であっても安定供給が確保される需給構造を実現するためには、エネルギー源ごとの強みが最大限に発揮され、弱みが他のエネルギー源によって適切に補完されるような組み合わせを持つ、多層的な供給構造を実現することが必要である。

～第2章第1節2. (1)各エネルギー源が多層的に供給体制を形成する供給構造の実現～

外務省資料「日本のエネルギー外交」より

2040年までの世界の一次エネルギー需要

主要な国際機関・研究機関によれば、化石燃料は引き続き主要な役割を担う見込み



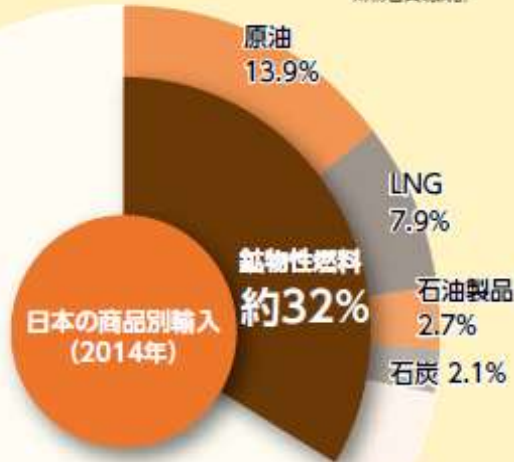
出典：IEA世界エネルギー展望 2015

日本の貿易に占めるエネルギー取引 (2014年)

財務省貿易統計

その他 68%

- 電気機器 (全体比 13%)
- 化学製品 (8%)
- 食料品 (8%)
- 原料・半製品 (8%)
- 一般機器 (7%)
- 原料品 (7%)



- 2014年の日本のエネルギー輸入額は約28兆円 (前年比約0.3兆円増)
- 輸入総額 (約86兆円) の約3分の1、日本の名目GDP (約491兆円) の約6%
- 内訳は、原油が約50%、LNGが約29%、石油製品が約10%、石炭が約8%

速報版は「資源・エネルギー統計」(経産省)で閲覧可。

国民生活、国としての成立にエネルギーは不可欠なので。

昨年、とあるタイミングのWTI原油価格。



(画像出所: CMEウェブサイト)

ついに、化石資源価格はマイナスに！



エネルギーと環境の未来



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

●今、(一部の) 人類は自由にエネルギーを消費している。

★資源はいつまでであるのか？

★発展途上国の人々は豊かになれるのか？

★地球の環境は破壊されないか？

—「持続可能(sustainable)」な社会にはエネルギーがいる。
その作り方、使い方が問題。

Physics Today, vol.55, No.4 (2002)

人工衛星(400個)の撮影画像から合成した地球の夜景

前回の課題

放射線関連の感覚。。について、教えてください。

➡もちろん、これに決まった正解はありません。

- ①自分の体や周りの環境が放射線を出してるって知ってた？。
- ②原子力発電所が家の近くにできた。いくらもらったら許せる？
- ③お金払ったら出てってくれるって？いくら払える？
- ④ 自分の寿命の最後の3日。いくらで売れる？
- ⑤自分の寿命の最後の3日。伸ばしてくれたらいくら払う？

いろんな答えがある。自分の被害、自分の利益なら、当然大きく
カウントしたい。立場が変われば逆。いたずらに高くしても意味がな
い。結局落ち着くところに落ち着いて、実はもう払ってある。



安全性って、なんだろう



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

- 「リスク」が許容範囲であること
 - $\text{リスク} = \text{ハザード} \times \text{確率} < \text{許容範囲}$ (支払ってもよい対価)
 - ベネフィットが大きければリスクは許される？
 - どんなに利益があっても許容できないリスクがある？
- リスクはどのように減らすか？
 - 確率を減らす
 - 被害(ハザード)を減らす

 - 許容範囲を見直す？

(でもこれは、結構理系的な考え方。)



では、リスクとは？



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

1) たとえば「ガンのリスク」

- ・ガンが増えるというのはどういうことか？
- ・どういうときにガンが増えるのか
- ・人は一回しか死なない

2) 許せるリスク、許せないリスク

- ・リスクへの対応
- ・保険と再保険
- ・対策と予防と緩和
- ・受け入れ可能なリスク
 - ーそこまで法、規制が保証する
 - つまり、すべての安全性は収斂する。
- ・地球温暖化問題

→結局、すべてのリスクは、「命ではかる値段」になる？

命は社会全体のリスクにより順位がつけられる。。

ワクチンの優先接種対象者及び接種順位(2)

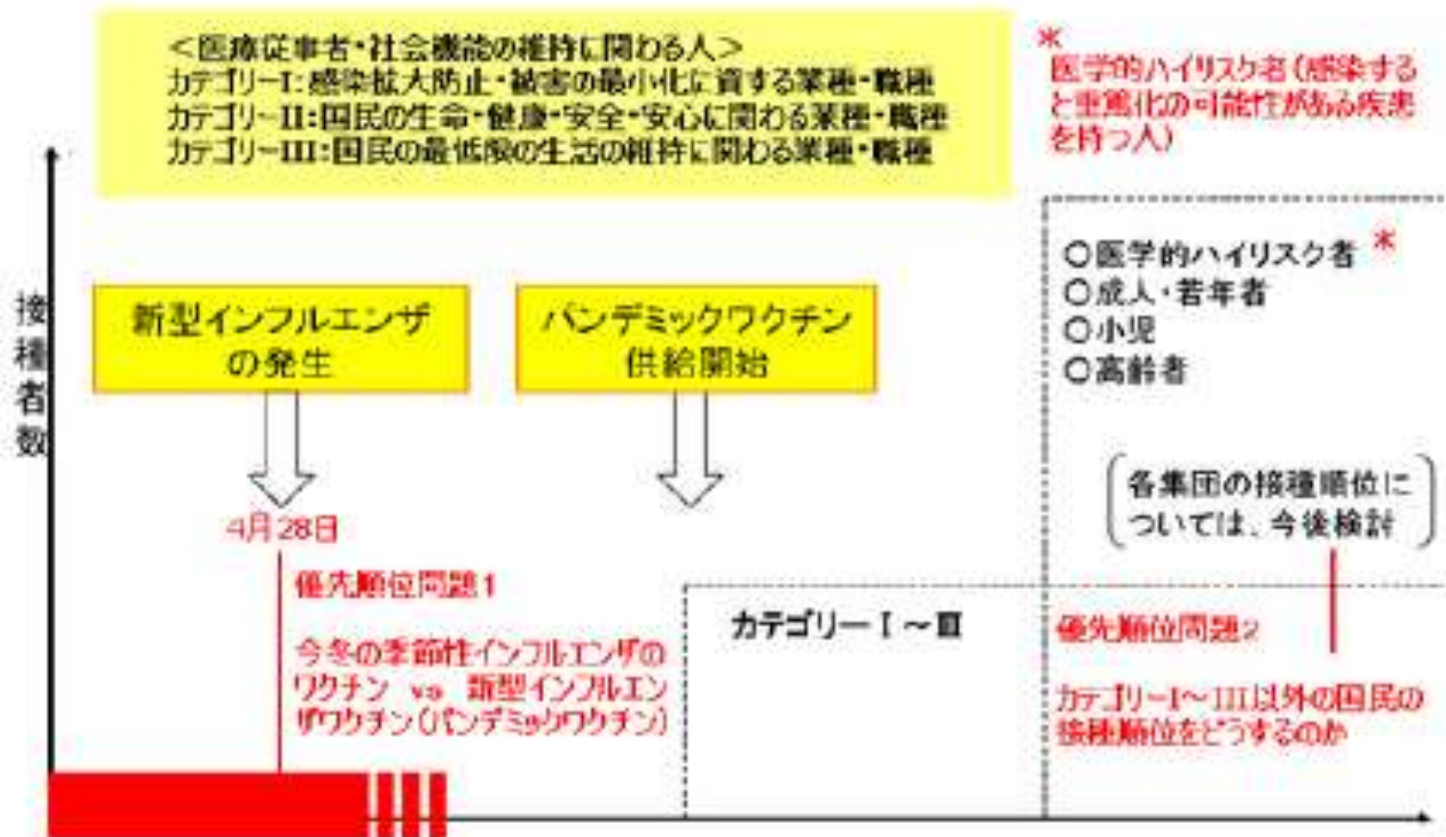
○接種対象者及び接種順位

対象者		理由	参考人数
優先接種対象者	インフルエンザ患者の診療に直接従事する医療従事者 (救急隊員含む)	インフルエンザ患者から感染するリスクが高く、医療体制に支障を来す恐れがある ⇒ 必要な医療体制を維持するために接種が必要	約100万人
	妊婦	新型インフルエンザに罹患して、重症化、死亡する割合が高い ⇒ 死亡者や重症者を減らすために接種が必要	約100万人
	基礎疾患を有する者		約900万人
	小児(1歳～小学校低学年)	乳児の入院率が高く、幼児の重症例がある、小児の感染率が高い ⇒ 死亡者や重症者を減らすために接種が必要 ※ただし、1歳未満の小児は、予防接種による効果が小さい →1歳未満の小児の親に接種	約1,000万人
1歳未満の小児の保護者	約200万人		
その他	小学校高学年、中学生、高校生	発症者の多数が10代以下の若年層。発症者数が多いため、相対的に重症者数が多数発生するおそれ ⇒ 死亡者や重症者を減らすために接種が望ましい	約1,000万人
	高齢者 (65歳以上)	現時点では、発症者数は少ないが、今後、患者数が増加した場合、重症化する高齢者が多数発生する可能性 ⇒ 死亡者や重症者を減らすために接種が望ましい	約2,100万人 (基礎疾患を有する者を除く)

※参考人数については、精査の段階で変更があり得る。

出典:「新型インフルエンザ(A/H1N1)ワクチンの接種について(素案)」厚生労働省より

2



日経メディカル、2009.5.より

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における

多核種除去設備等処理水の処分にに関する基本方針

令和3年4月13日

廃炉・汚染水・処理水対策関係閣僚等会議

またひとつ、
「総合的なリスク管理」
問題が。。

原子力災害からの復興・再生には、廃炉・汚染水・処理水対策の着実な進展が不可欠である一方、廃炉を性急に進めることで、かえって風評影響を生じさせ、復興を停滞させることはあってはならない。そのため、「復興と廃炉の両立」を大原則としつつ、放射性物質によるリスクから、地域の皆様や作業員の方々、周辺環境等を守るための継続的なリスク低減活動として廃炉を計画的に進めている。

- ② 処分方法としては、各国の放射線防護基準において広く参照されている ICRP の勧告に沿って従来から定められている規制基準を厳格に遵守することを前提に、国内で放出実績がある点やモニタリング等を確実かつ安定的に実施可能な点を評価し、海洋放出を選択する。今後、東京電力は、海洋放出を実際に行う前に、その詳細な計画や必要な設備等の設置について、原子力規制委員会から認可を取得する必要がある。こうした原子力規制委員会の認可を得た上で、東京電力は海洋放出を実施することとなる。



THE DARK SIDE OF FORCE (AND ENERGY)



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

エネルギーは、エネルギーである限り、
ヒトや環境に必ず影響を及ぼす。

➡その影響には、必ず悪いものもある。

ここでいきなり、課題1。

Power, Energy, Force.

似ているけど、違う。よく混同されてる。
区別を述べよ。(日本語で適当な訳がない。概念が違うんですが。)

例によって、理系的、文系的表現あり。
理系的には、単位が言えればますます。

とりあえず、
「無尽蔵」で「クリーン」な
エネルギーがあったらいいかも。

どんな技術も、最初は「無理っ！」でところから開発してる。
研究と技術開発は、それを可能としてきた。

でも、ほんとにそれでいいのかな？
は、ちょっと考えておこう。。。

僕たちが思い描いた未来は、みんな核融合で動いていた！

- PLANETES (ΠΛΑΝΗΤΕΣ), 1999
 - 著者: 幸村誠
 - 木星往還用宇宙船の動力に「タンデムミラー型核融合エンジン」を採用。

Amazon

- 機動戦士ガンダム¹⁹⁷⁹
 - 原作・総監督: 富野喜幸
 - モビルスーツのエネルギー源は、「ミノフスキー・イヨネスコ型核融合炉(D-He3反応)」とされている。
 - 使用されている材料は、ルナチタニウム合金(ガンダリウム合金)

円谷プロ

- ウルトラマン, 1966
 - M78星雲は核融合炉プラズマスパークタワーでエネルギーを得ている

じ

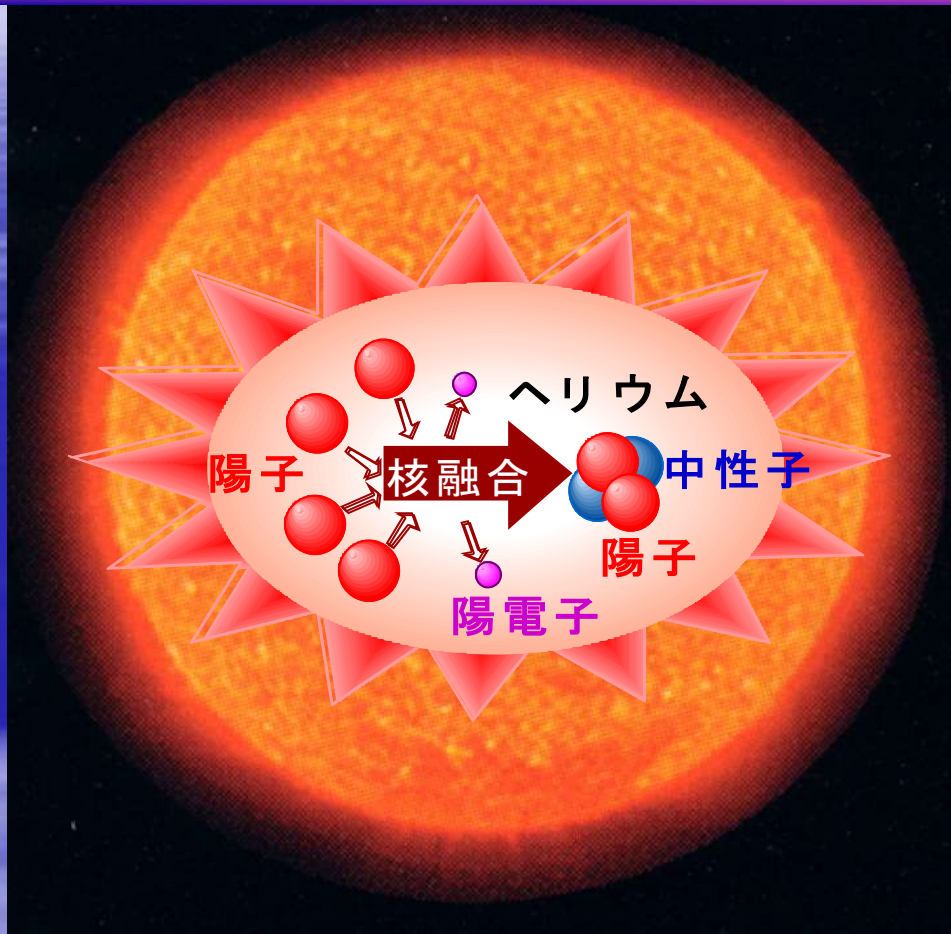
SFではない未来が、
もうそこまで来ている。



太陽のエネルギー：核融合



Institute of Advanced Energy, Kyoto University



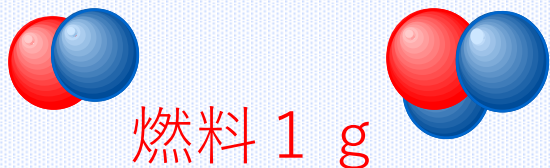
太陽の燃焼

中心温度：1,500万度
反応時間：100億年
燃料：水素

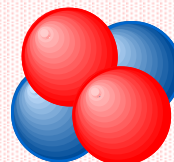
人工の核融合

温度：2億度
反応時間：1秒
燃料：水素の一種

重水素 トリチウム



ヘリウム 中性子



石油 8 t



恒星で起こる核融合



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

-重力を利用した核融合-



太陽の場合

中心温度: 10^7 K (1,500万K)

密度: 150g/cm^3

水素燃焼



重力収縮 (10^8 K, 10^5 g/cm³)

ヘリウム燃焼 ($\alpha + \alpha \longrightarrow$)



重力収縮 (10^9 K, 2×10^5 g/cm³)

炭素燃焼 (${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \longrightarrow$)



最終的には、鉄の中心コアを形成



核融合でエネルギーが生じる理由

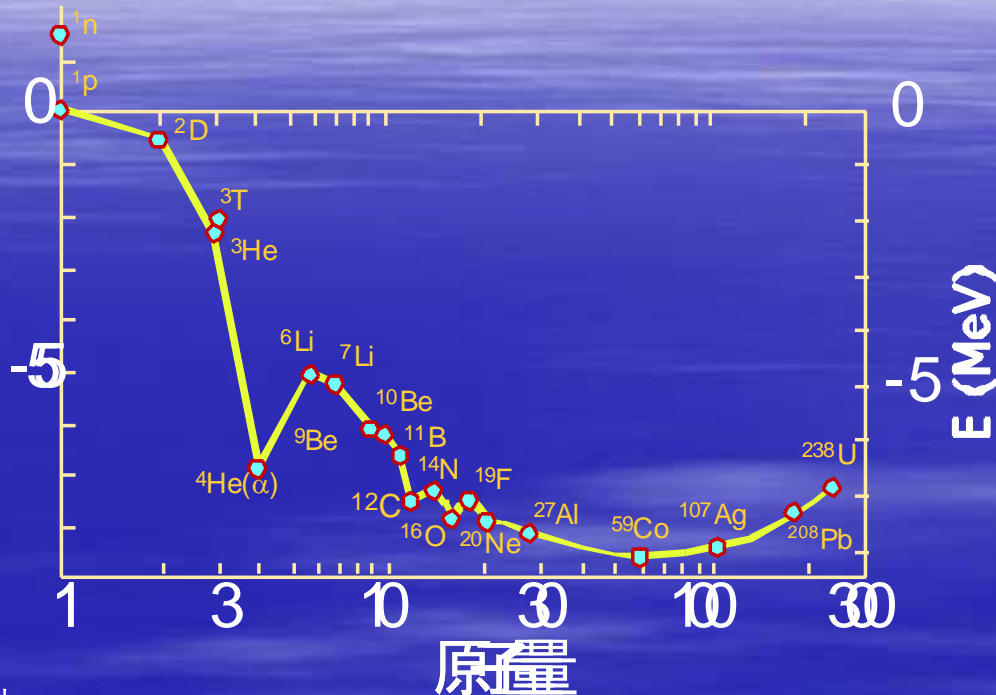


Institute of Advanced Energy, Kyoto University

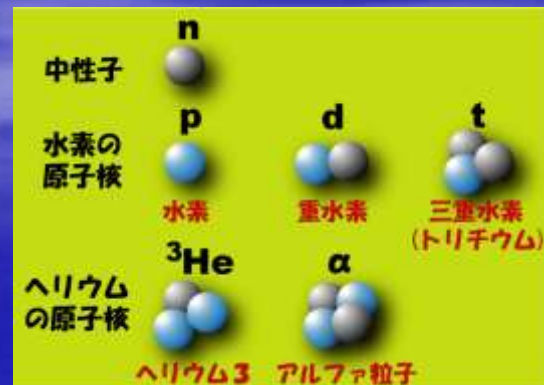
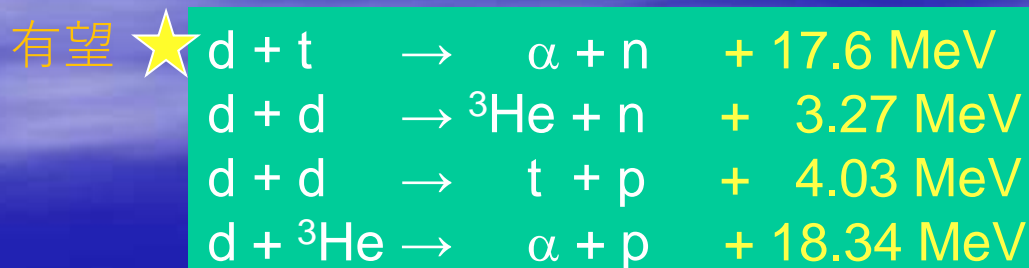
原子核の反応では、質量が減る。

$$E = \Delta mc^2$$

- 原子量 < 60
→ 核融合で質量欠損
- 原子量 > 60
→ 核分裂で質量欠損



地上の核融合で有用な反応

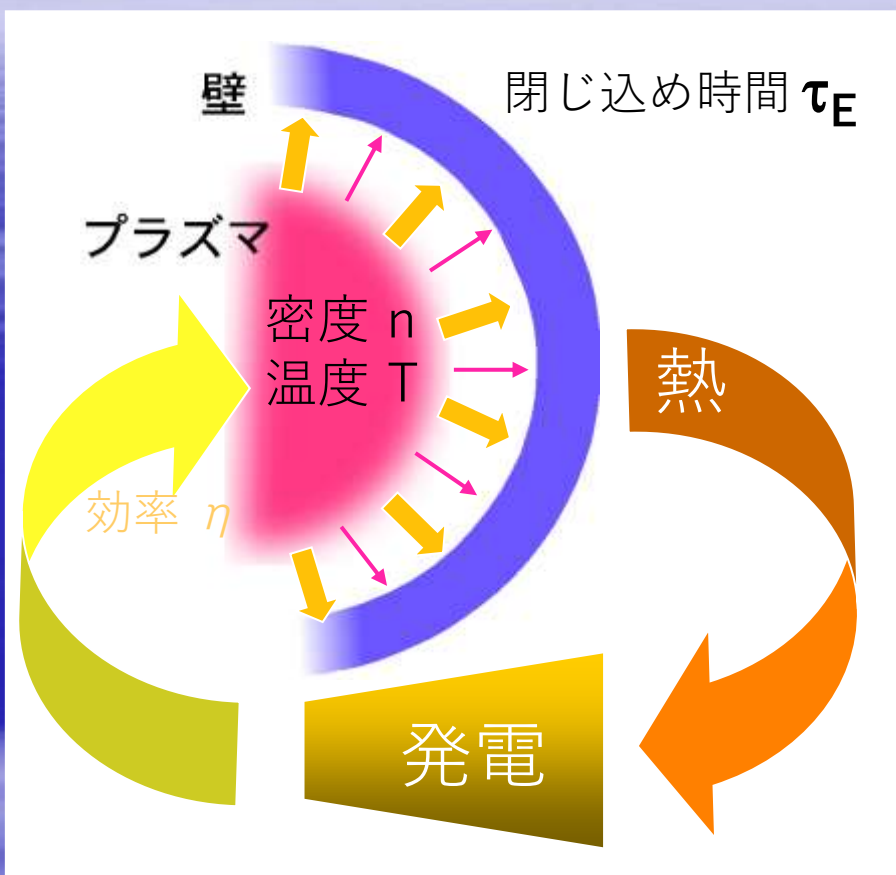


減った質量が運動エネルギーになる。

「熱」核融合の成立条件



Institute of Advanced Energy, Kyoto University



壁の受熱

- プラズマ流出

$$P_{pl} = \frac{3}{2} (n_i T_i + n_e T_e) / \tau_E \propto \frac{nT}{\tau_E}$$

- 核融合出力

$$P_{fus} = \frac{n_i^2}{4} \langle \sigma v \rangle E_{fus} \propto n^2 f(T)$$

受熱パワーをプラズマの生成・保持に回せばよいので

核融合の条件は

$n\tau_E, T$ で表せる

核融合でエネルギーを取り出すためには、

核融合出力 > 入力パワー でないといけない。

(世の中には、トータルエネルギーがマイナスになるものが結構ある)

要するに、プラズマが冷めるまでにそれ以上の熱を出す反応を起こす。



1億度のプラズマを1秒閉じ込める

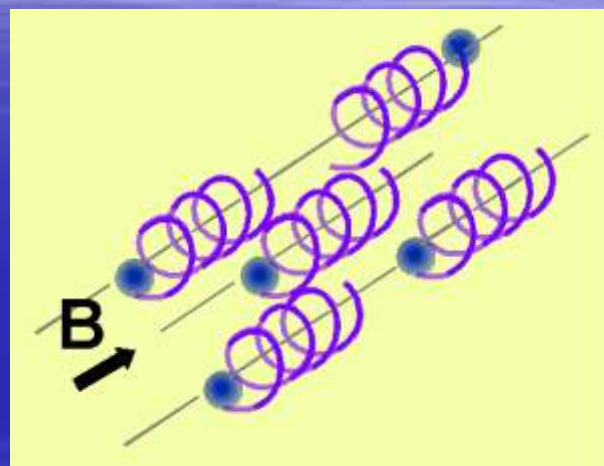
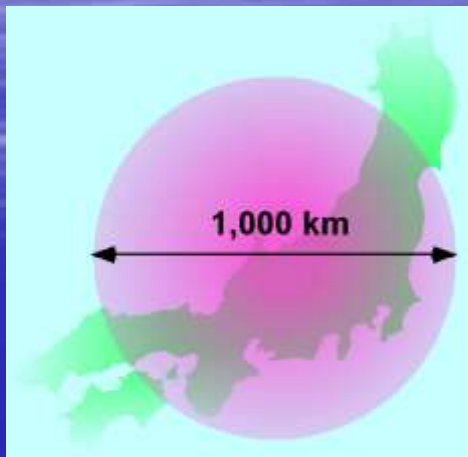
Institute of Sustainable Science



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

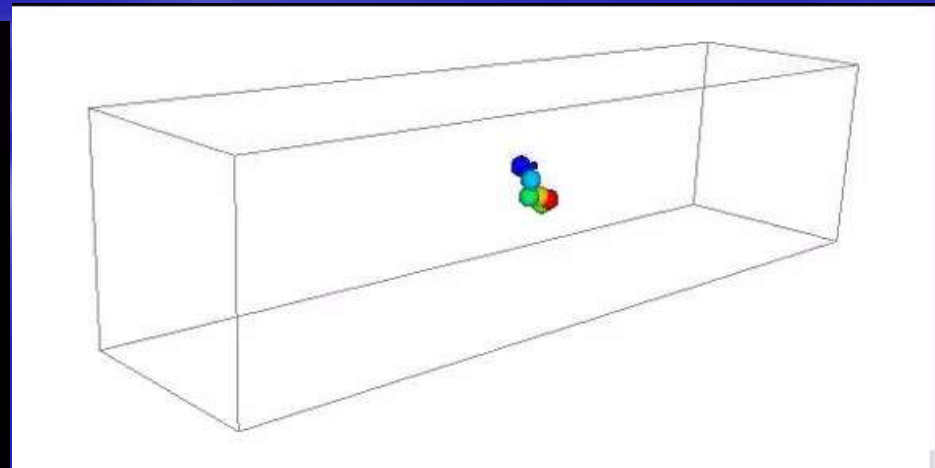
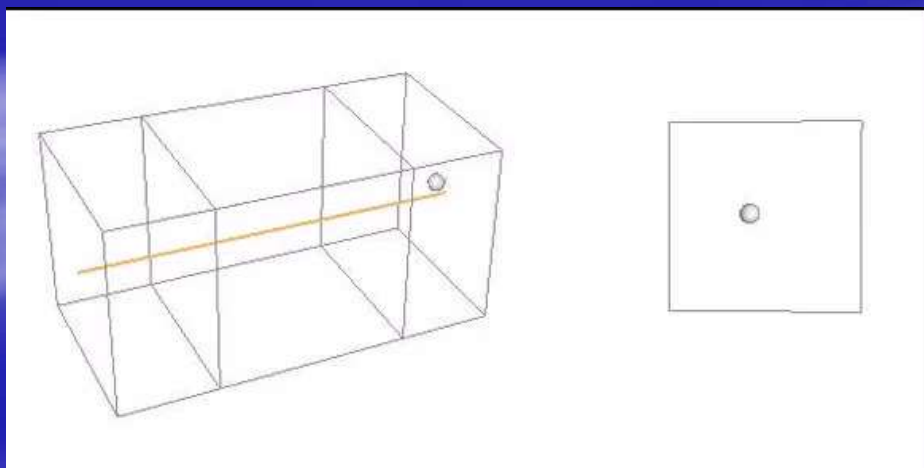
熱運動にまかせると

強力な磁場を利用



1,000kmの閉じ込め容器が必要

荷電粒子は磁力線を中心にサイクロトロン運動



しかし、磁力線方向には自由に動ける

粒子の運動：イオン、電子

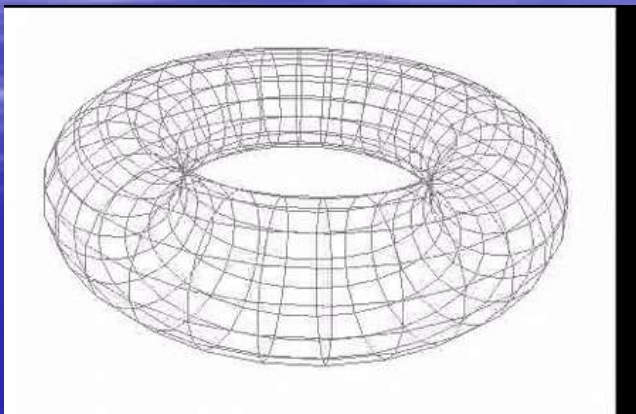


プラズマの閉じ込め

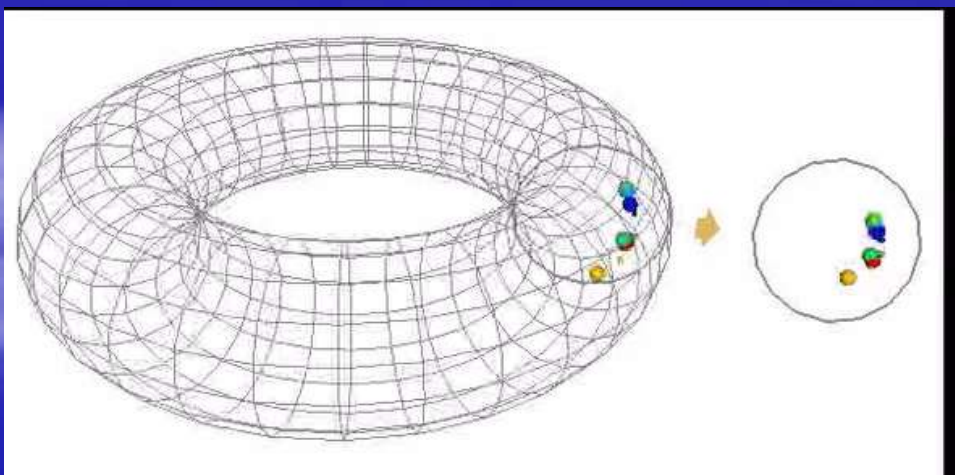
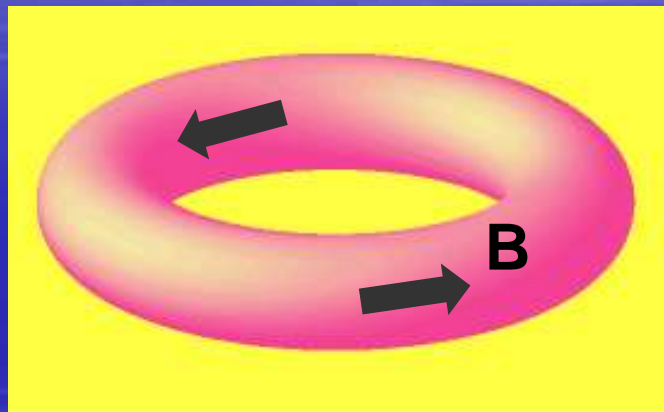


Institute of Advanced Energy, Kyoto University

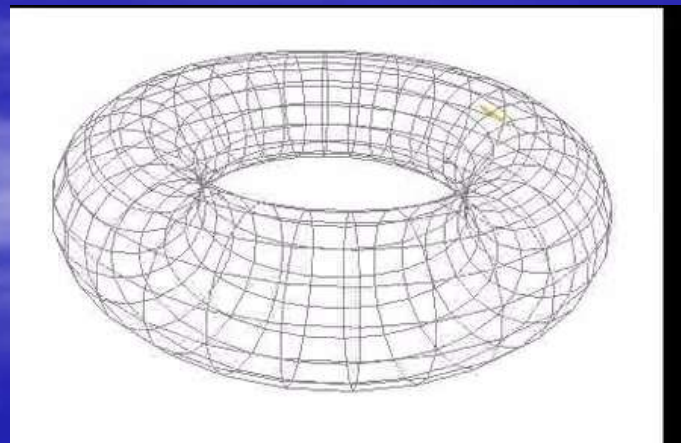
すべての磁力線の端をつなぐ



磁力線をトーラス状（ドーナツ）にする



トカマク磁場で粒子が閉じ込められる



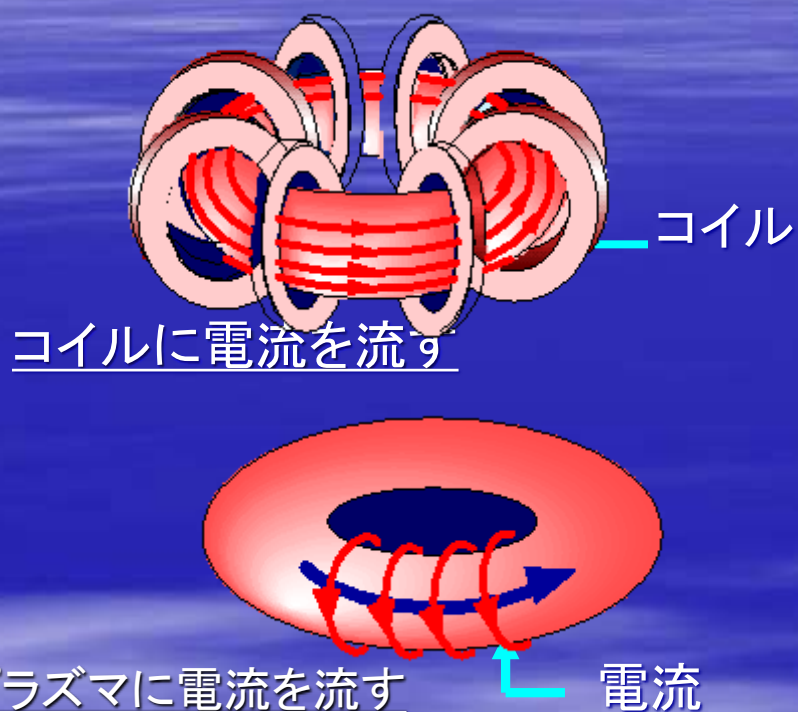
プラズマの電流でも磁場ができる



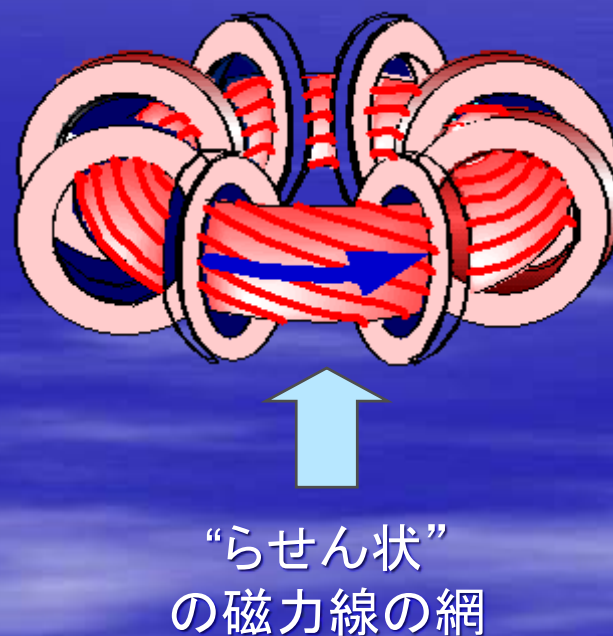
トカマクの原理



Institute of Advanced Energy, Kyoto University



トカマク

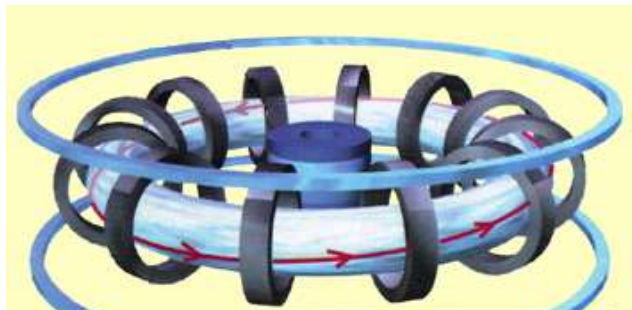


Toroidalnaya Kamera Magnitnaya Katushka

磁力線をらせん状にして、プラズマを安定に閉じ込める

トカマク方式

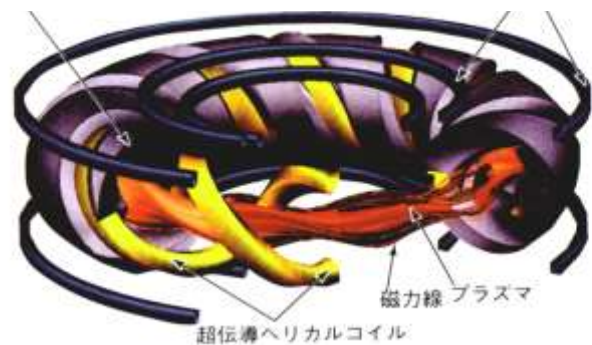
プラズマ自身で環状電流を形成



日本原子力研究開発機構、JT60

ヘリカル方式

螺旋状の外部コイルを利用



京都大学、ヘリオトロンJ

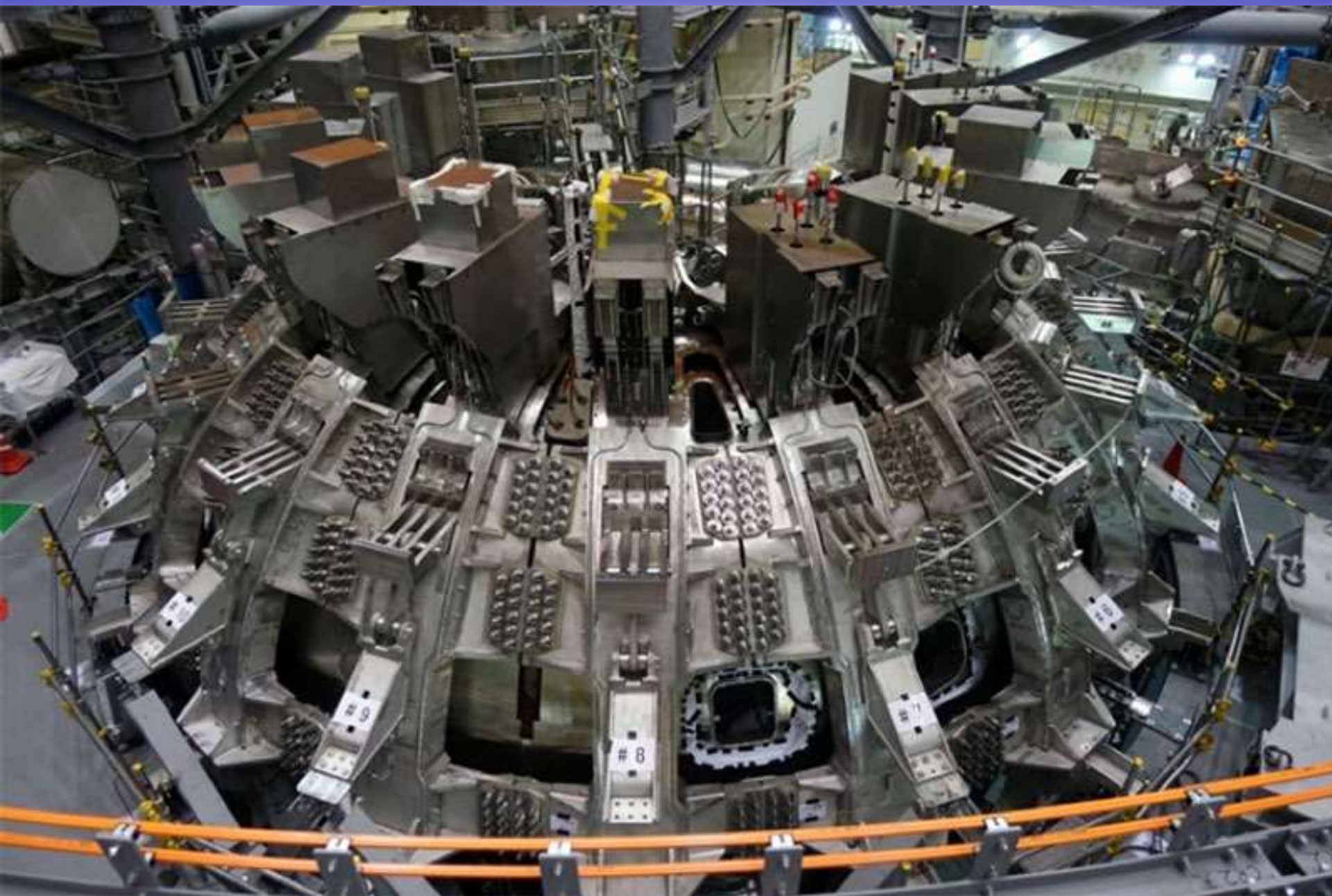


核融合実験装置(トカマク)



Institute of Advanced Energy, Kyoto University







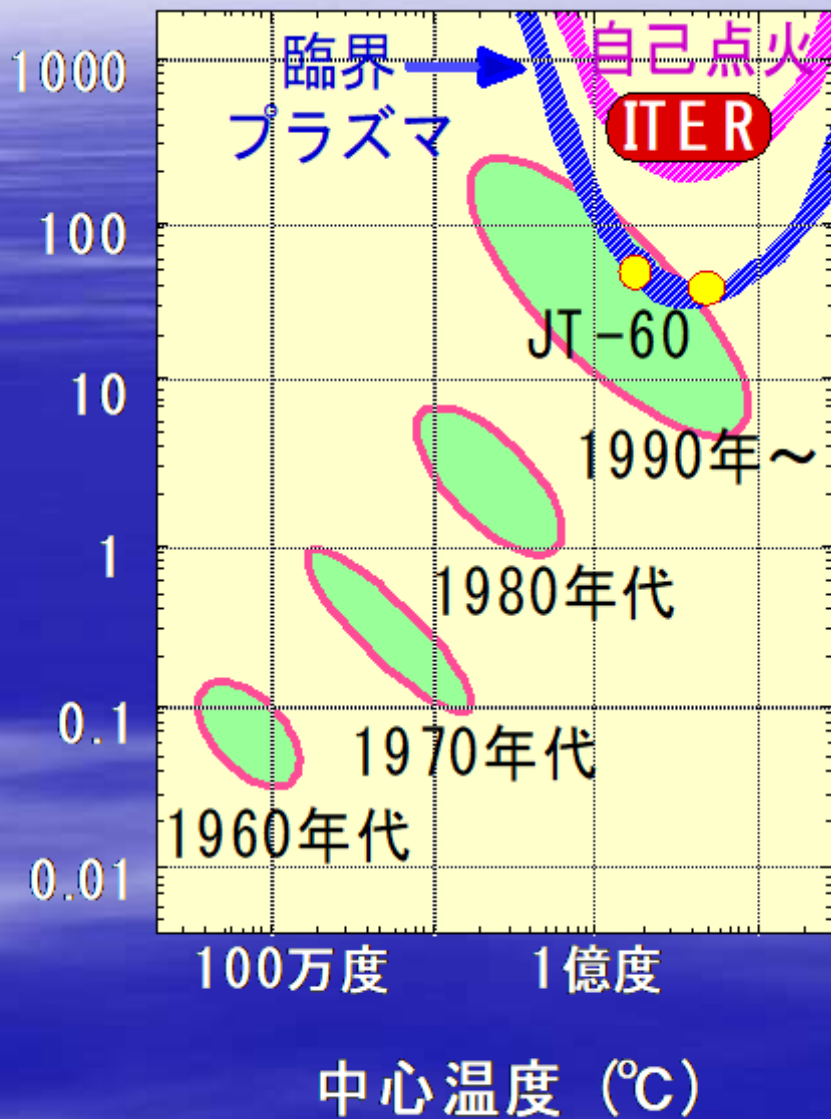


プラズマ研究の進歩



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

閉じ込め時間 × 中心密度
・ 秒 ・ 兆個 / 立方センチ ・



→ 温度、閉じ込め性能とも
数桁の進歩

→ 装置性能も桁での進歩が
要求されてきた

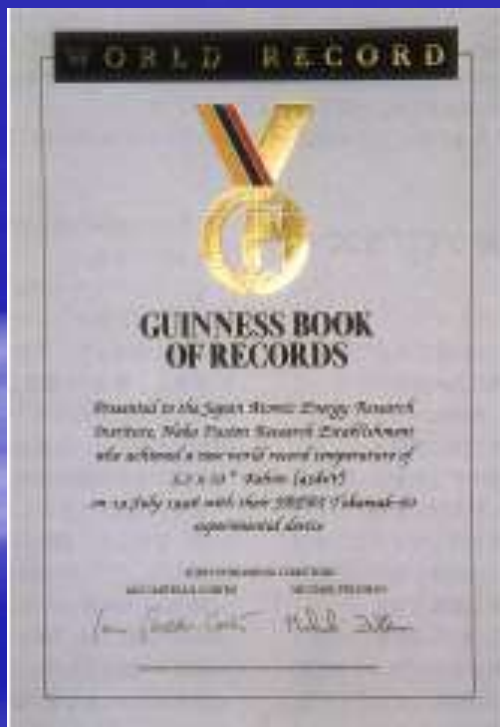
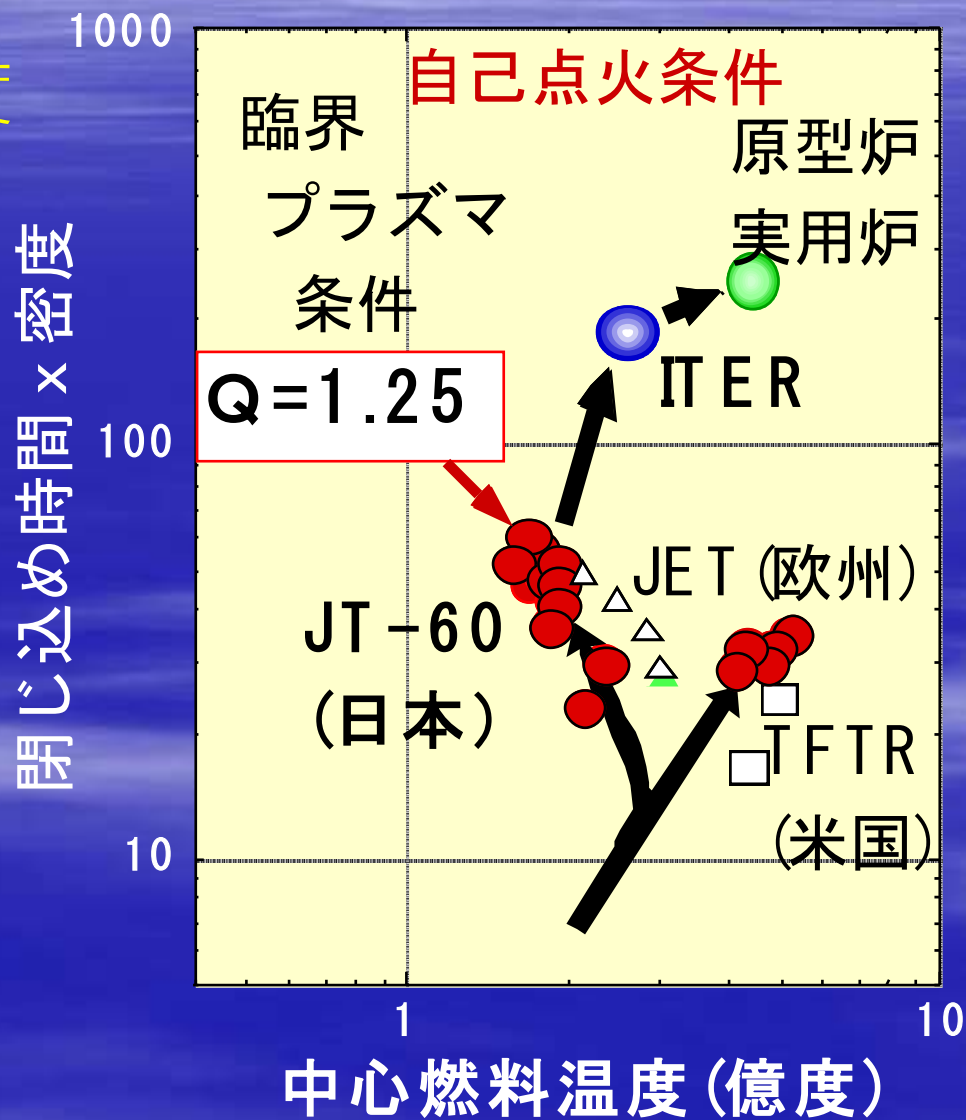
→ これまでその進歩は
順調だったが。。

プラズマ性能の進展



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

地上の最高温度
プラズマ温度：5.2億度



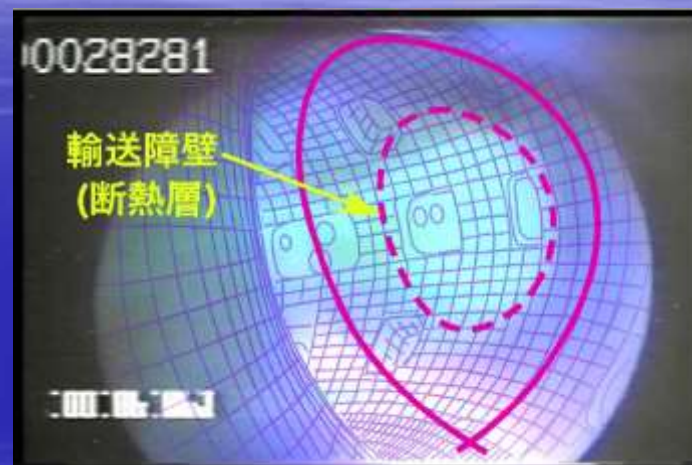
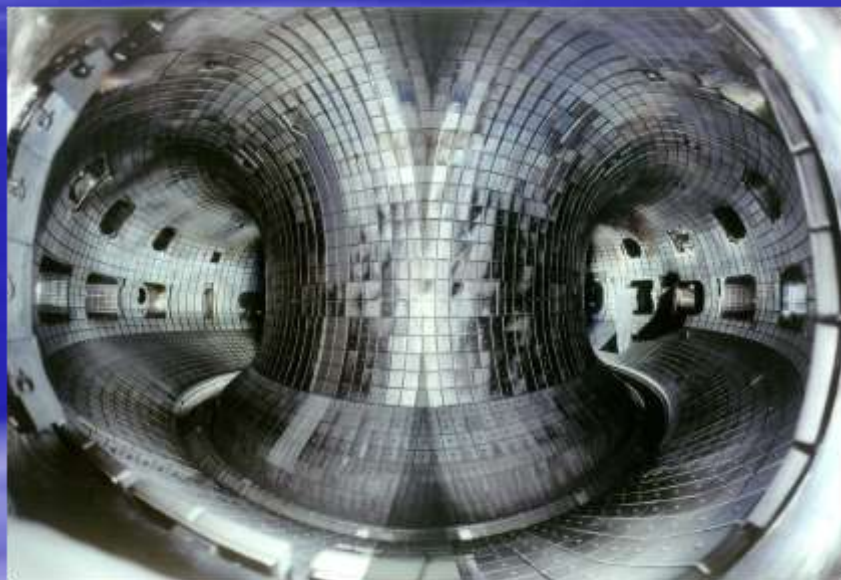


核融合装置とプラズマ

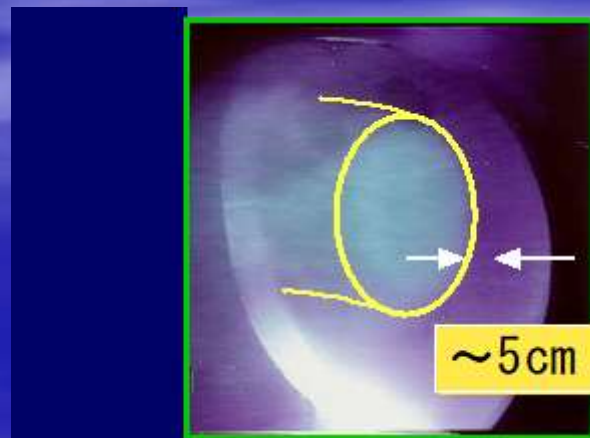


Institute of Advanced Energy, Kyoto University

ドーナツ型の核融合装置



プラズマ



JT-60における
負磁気シア放電

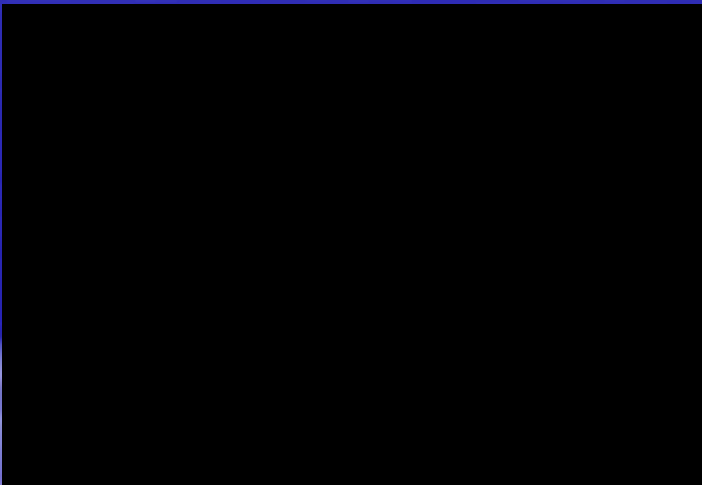


プラズマの動き2

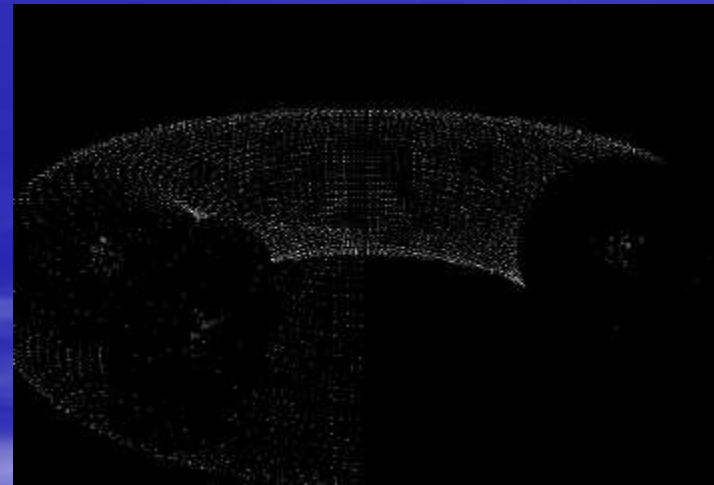


Institute of Advanced Energy, Kyoto University

シミュレーションによる理解



粒子としての動き



流体としての動き

課題 2

1. 下の問題のいずれかまたは両方に**好きな方法**で答えなさい。

①酵母の個体数が1時間で2倍になり、また酵母1個体が1時間に 10^{-10} モルの以下の反応を行うとする。



初期条件: ①100ccの水中にブドウ糖18g、酵母1個体および

②100ccの水中にブドウ糖90g、酵母1個体

で起こることを**記述せよ**。ただし、エタノール12%で酵母は死滅する。

($\log 2 = 0.301$ 、しかし $2^{10} = 10^3$ として差し支えない)

②酵母を砂糖水に入れて放置した。何が起こるかを**記述せよ**。

未来のエネルギーとしての核融合



安全 & 環境に優しい



燃料の元栓を締めると反応が自動停止 かつ
高レベル放射性廃棄物無し

燃料1gで石油8トン分のエネルギー

高効率エネルギー

エネルギー ← 質量差
 $E = m \cdot c^2$



7 エネルギーをみんなに
そしてクリーンに
エネルギー問題
環境問題の根本的解決



リチウムから自分で
三重水素 (トリチウム)
を作る

豊富な燃料

燃料は無尽蔵 (海中から)
重水素33g/トン
リチウム0.2g/トン

超伝導 (MRI、量子コン
ピュータなど) やロボットな
ど未来に向けた先端技術
の塊



先端技術の結晶

(提供: 量子科学技術研究開発機構)

直近の政策文書における核融合に関する記載



- パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（令和元年6月11日閣議決定）において、重点的に取り組む横断的施策の一つとして、核融合を記載。

（前略）

核融合エネルギーについては、トカマク方式のITER計画や幅広いアプローチ活動の着実な推進と並行して、我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式等の研究を推進し、科学的・技術的実現性の確立を目指す。

○関連する技術の例

- 核融合 実験炉、超伝導トカマク装置、ヘリカル方式等

- 統合イノベーション戦略2019（令和元年6月21日閣議決定）において、国際ネットワークの強化の一つとして、記載。統合イノベーション戦略で初めて、ITER計画及び核融合分野について記載。

- ビッグサイエンスに関しては、核融合分野のITER計画等や宇宙・海洋分野等の大型国際共同研究プロジェクトについて、長期的視野に立ちつつ、投資に見合った研究開発成果が得られるよう、戦略的に取組を推進する。

- 革新的環境イノベーション戦略（令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定）において、エネルギー転換の一つとして、核融合エネルギー技術の実現を記載。

ITER(国際熱核融合実験炉)計画について

令和2年度予算額(案) 16,494百万円
 (前年度予算額 14,547百万円)



【概要】

エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉 ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の確立を目指す。

- ITER協定 2007年10月24日発効

● 経緯

1985年 米ソ首脳会談が発端
 1988年～2001年 概念設計活動・工学設計活動
 2001年～2006年 政府間協議
 2007年 ITER協定発効、ITER機構設立

- 参加極 日、欧、米、露、中、韓、印

- 建設地 仏、サン・ポール・レ・デュランス市 (カダラッシュ)

● 計画スケジュール

運転開始 : 2025年12月
 核融合運転開始 : 2035年12月

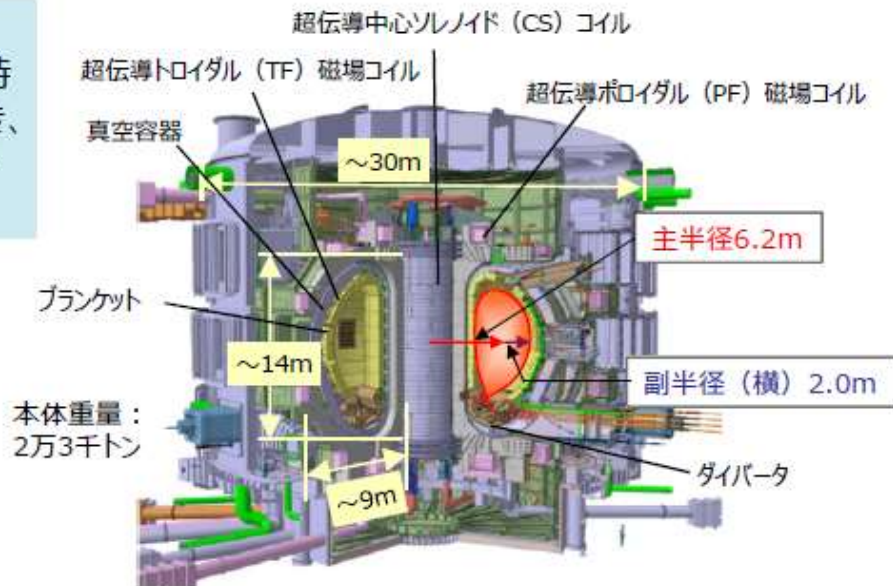


● 各極の費用分担 (建設期)

欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インド
 45.5% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%

※ 各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組み

- ITER機構長 ベルナル・ピゴ氏 (仏)
 (2015年3月～2019年1月任期延長決定～2025年3月)



● 技術目標

- ◇ 入力エネルギーの10倍以上の出力が得られる状態を長時間 (300～500秒間) 維持する。
- ◇ 超伝導コイル (磁場生成装置) やプラズマの加熱装置などの核融合工学技術を実証する。

● 主要パラメータ

熱出力 (発電はしない)	50万 kW
入力エネルギーに対する出力の割合	10以上
プラズマ体積	約840m ³



ITER計画とは



Institute of Advanced Energy, Kyoto University

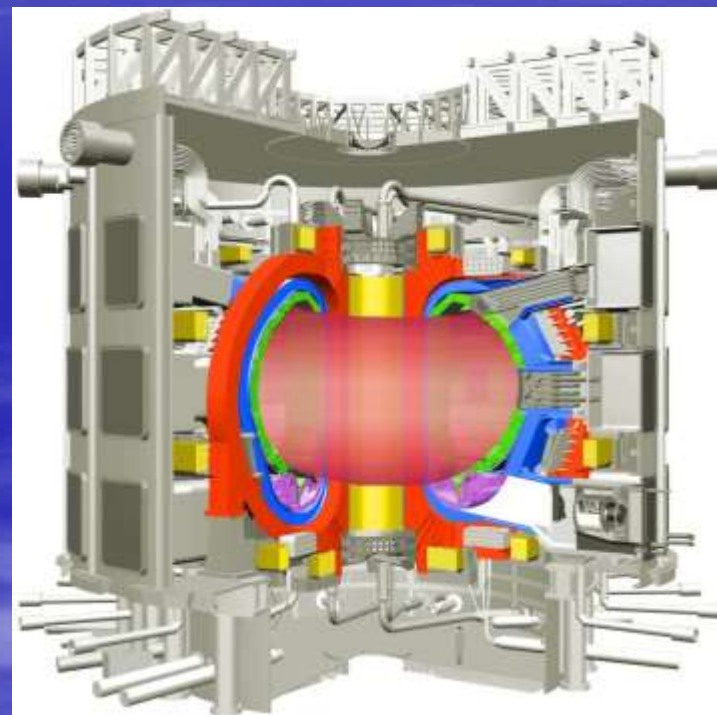
International Thermonuclear Experimental Reactor (国際熱核融合実験炉)

目的

核融合エネルギーの実現可能性
を国際共同により実証
システム統合による工学的実証

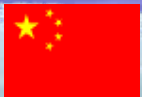
経緯

- ◆ 1988年より日・欧・米・露の
4極で設計開始（途中で米が離脱）
 - ◆ 2001年に国際共同設計が完了
 - ◆ その後、韓国、中国、インドが
参加
- 2008年から建設開始
- 建設期間10年
運転期間20年、と当
初言ってたんだけど？



建設コストが高すぎるので。
→国際分担

南フランスのITER建設サイト(



ITERトカマク建屋



ITER建設サイト(2009年)





December 2016



April 2017



- JA has completed the manufacture of 5 x 415 m (sDP) and of 7 x 760 m (rDP) conductor Unit Lengths (UL's).



Cable Insertion

Compaction
& Spooling

Global He Leak Test
& Dye Penetrant Test

Site Construction Progresses (1)

View of the On-Site Construction



© 2012, ITER Organization

Lower Basemat and Anti-Seismic Isolators



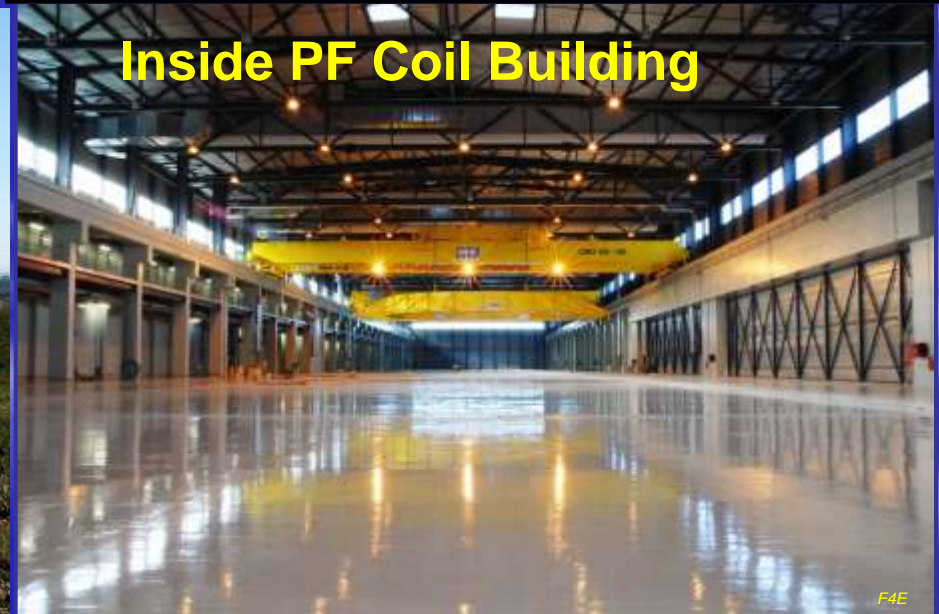
© 2012, ITER Organization

PF Coil Winding Building



© 2012, ITER Organization

Inside PF Coil Building



F4E



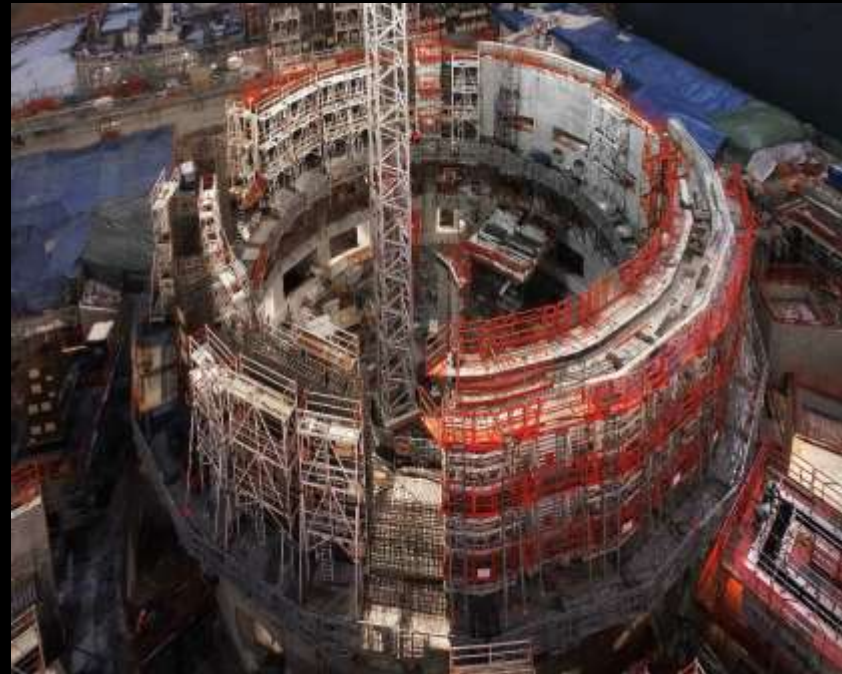


December 2016



April 2017





2018年。

2017年の建設現場



フランスにできたITER (2017京大製)

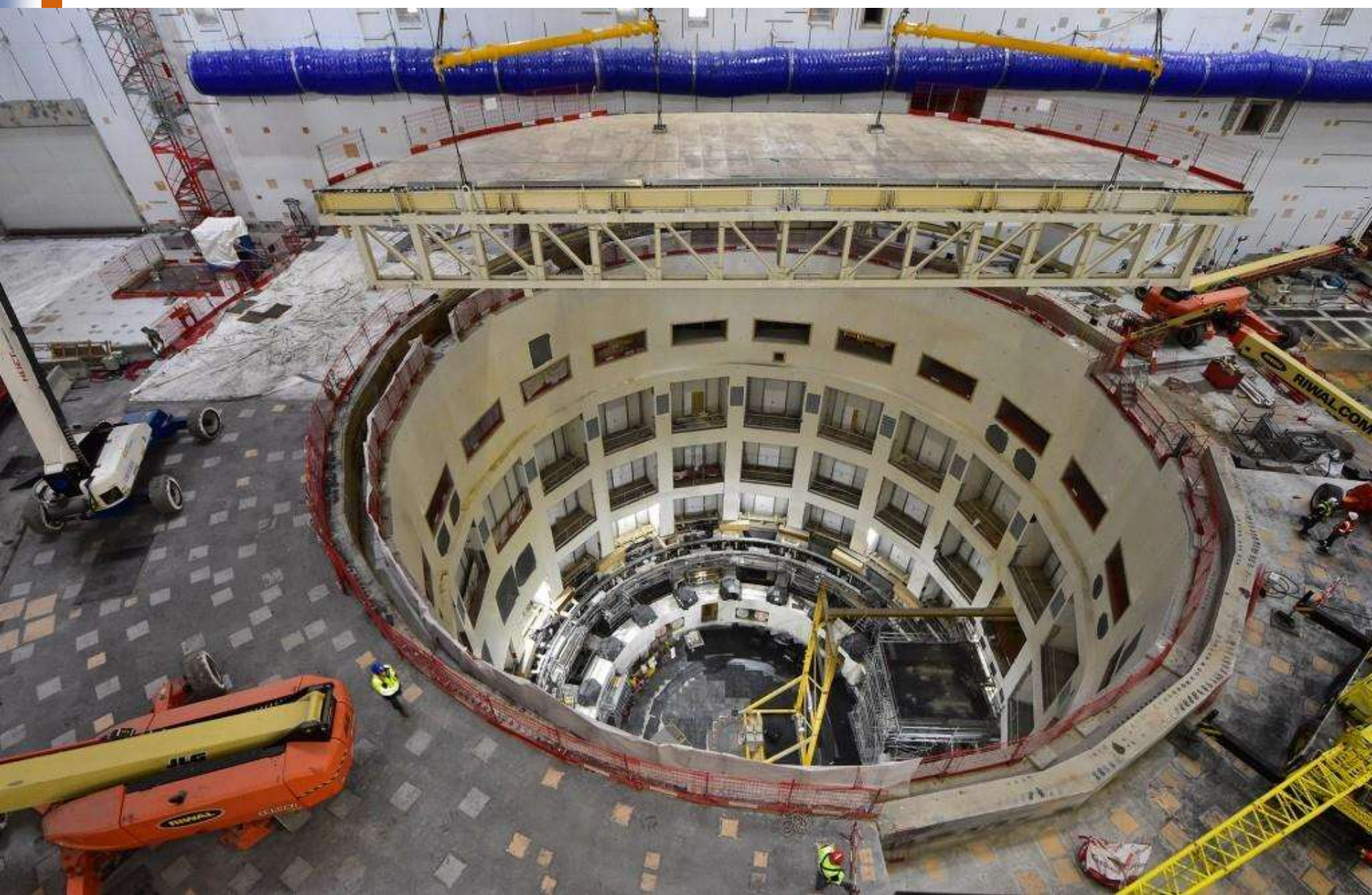


Institute of Advanced Energy, Kyoto University





2020, by ITER Organization



2020, by ITER Organization, <https://www.iter.org/>

北米,英国等で民間会社が「ゴールド・ラッシュ」の様相

MIT

COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS

tokamak energy

Cambridge

英国政府

HYPERJET FUSION CORP

ビル・ゲイツ, Eni社

AGNI

Helion Energy

CTFusion

COMPACT FUSION SYSTEMS

HORNE TECHNOLOGIES

first light

tae TECHNOLOGIES

MIFTi

LPP FUSION

Princeton SATELLITE SYSTEMS

STRONG ATOMICS

ジェフ・ベズス

fuse

STELLAR ENERGY FOUNDATION

PEGASUS FUSION STRATEGIES

general fusion

カナダ政府

EMC2

世界に遅れること約20年、
日本(実は京大)から核融合
ビジネスが起業！

なぜこれが可能なのか？
なぜ必要なのか？

世界の核融合開発は
民間に移行するのか？

大学研究者(学生も)は
核融合で何をやるのか？

…については、次回以降で。



日本経済新聞

朝刊・夕刊 ストーリー Myニュース 日経会社情

トップ 速報 経済・金融 政治 ビジネス マーケット テクノロジー 国際 オピニオン

自動車・機械 関西 京都

保存 共有 印刷 並び替え 拡大縮小 印刷

核融合発電向け主要部品を設計・開発する京都大学発のスタートアップがこのほど誕生した。京都フュージョニアリング（京都府宇治市）で、核融合研究の第一人者である京大エネルギー理工学研究所の小西哲之教授の研究成果を基に液体金属を使って熱交換率が高い方法で高温プラズマからエネルギーを取り出す「ブランケット」という部品の開発・設計を担う。

小西氏ら社員は4人で資本金は4千万円。京大が全額出資する京都大学イノベーションキャピタルが約8000万円を出資した。2021年にも最初の納入を目指す。



京都大学から日本初の核融合スタートアップが誕生した

民間企業における核融合研究開発の例

京都フュージョニアリング（株）

我国初、京都大学の研究から設立された核融合エンジニアリングの大学発スタートアップ企業
世界中の官民核融合研究開発企業の支援をするBtoB研究開発・機器/システム製造を事業化

- ・ コンサルティング
- ・ 研究開発（実験含む）
- ・ 機器/システム製造
- ・ 核融合技術の応用

京大の独自技術



・ 会社名	京都フュージョニアリング（株）	
・ 所在地	京都府宇治市五ヶ庄平野5番地24	
・ 設立	2019年10月1日	
・ 事業内容	核融合炉内機器及び付属システムの開発研究、事業化	
・ 資本金	4,000万円	

出資者：京都大学イノベーションキャピタル
 （文科省の政策・大学による学内ベンチャー支援）



総額 7,530 万円 投資
 社外取締役 1 名 派遣

世界では民間による核融合ベンチャーが大きな潮流

- ・ 小型炉・革新的アイデアによる早期実用化
- ・ 10～100億規模で数10社が活動
- ・ 民間（資産家、大学、VC）、政府による出資
- ・ 環境問題による資金の移動 (divestment)

事業計画

- ・ 2020年：核融合炉機器・実験装置の**製品開発**、実証
- ・ 2021～：顧客“**試験計画**”にコンサル、試験装置 販売
- ・ 2023～：顧客“**実験炉・実証炉**”に対し、システム“**ユニット**”販売、**エネルギー実証部分を担当**
- ・ 2025～定期交換部品を継続販売、エネルギーシステム、**脱炭素技術**のメーカーとして世界の主力を目指す

世界の主な核融合ベンチャー



潜在顧客

社名	調達額 (\$)	主な出資者
Takamak Energy Ltd.	英国 \$80M	VC
First Light Fusion	英国 \$36M	Oxford univ. VC
Commonwealth Fusion	米国 \$115M	Bill Gates, MIT

他社出資者：Jeffrey Bezos, Paul Allen, Google, 英国政府、カナダ政府、ロシア政府、ケンブリッジ

<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

2050年カーボンニュートラルに伴う グリーン成長戦略

令和2年12月

核融合開発も新たな時代に入っている！

1 (3) . 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

- 全ての分野において、技術開発から、**社会実装** + 量産投資による**コスト低減**へ
- 機械的な試算によると、この戦略により、**2030年で年額90兆円、2050年で年額190兆円程度の経済効果**が見込まれる。

核融合

- ・2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。
- ・核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。

海外プロジェクトに日本のベンチャー等が研究開発・サプライヤーとして参画、
機器納入

2021年

2022年

2023年

2024年

2025年

すみません。ウェブ授業について、教えてください。(2回目)

①何でつながりました？

- ・大学のPC(研究室/共用)
- ・自宅のPC
- ・携帯
- ・ネット環境は？つながった？

OK!/助けが欲しい。。

②PandAでの課題提出、難しいですか？Zoomは使い慣れた？

③質問、コメントの出し方、わかります？

(いいね👍とか、チャットとか。。発言もできるんだけど？)

④ 動画ストリーミング、見ます/見ました/たぶん見ない？

⑤ システム上の改善要求、質問、など。