

海水から太陽をつくる ～核融合炉が拓く未来～

静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター

近田 拓未

Web: <https://www.shizuoka.ac.jp/chikadalab/>

E-mail: chikada.takumi@shizuoka.ac.jp

今日のお話

- 1 なぜ核融合？
- 2 核融合炉のしくみ
- 3 核融合炉の現在と未来

1 なぜ核融合？

2 核融合炉のしくみ

3 核融合炉の現在と未来

3Eのトリレンマ

経済 vs. エネルギー

- ✓ 資源・エネルギー不足
- ✓ 食糧不足
- ✓ 貧富の差 etc.

エネルギー vs. 環境

- ✓ 温暖化
- ✓ 森林破壊
- ✓ 酸性雨 etc.

人類存続の危機！

経済
Economy

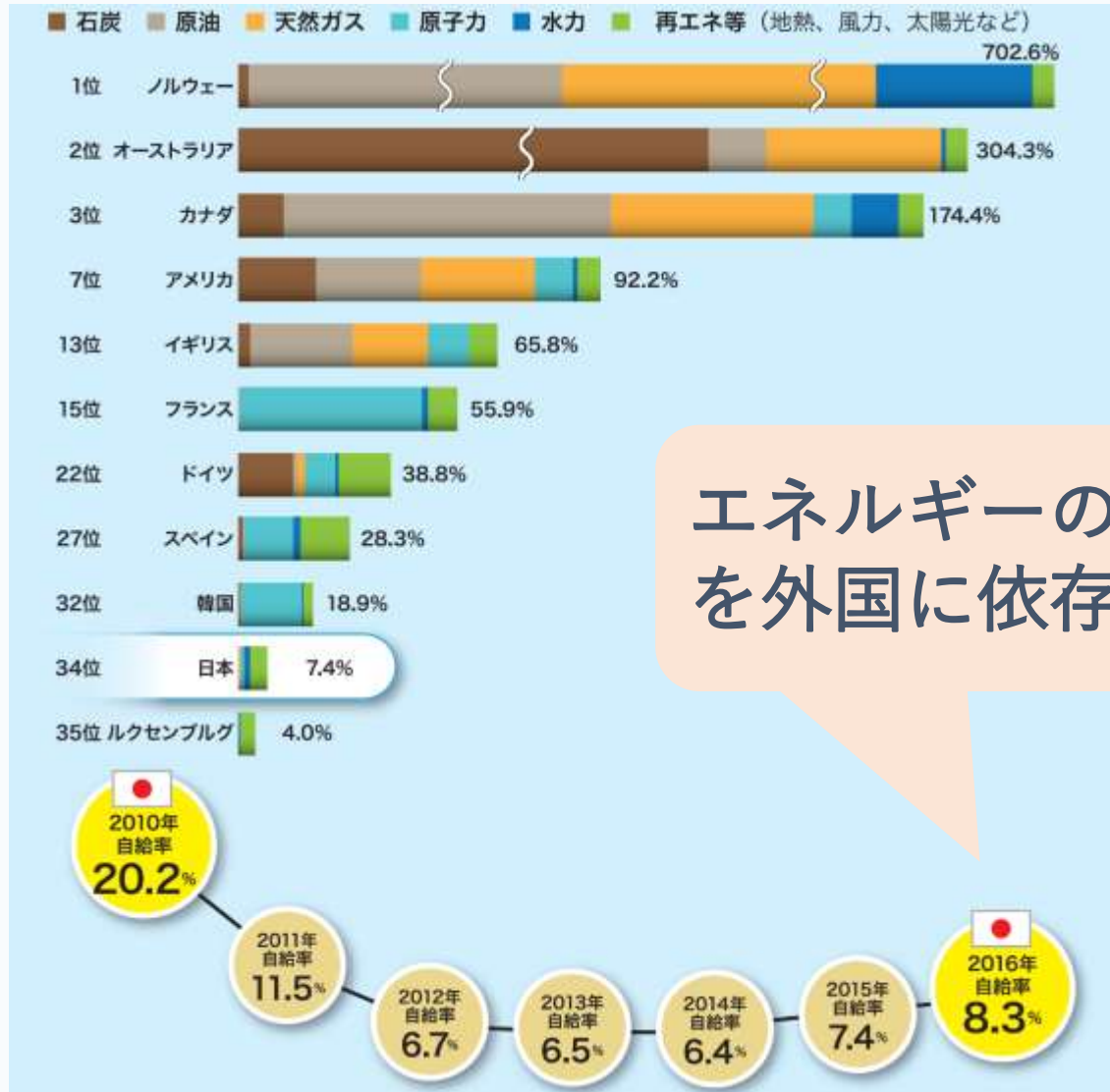
環境
Environment

経済 vs. 環境

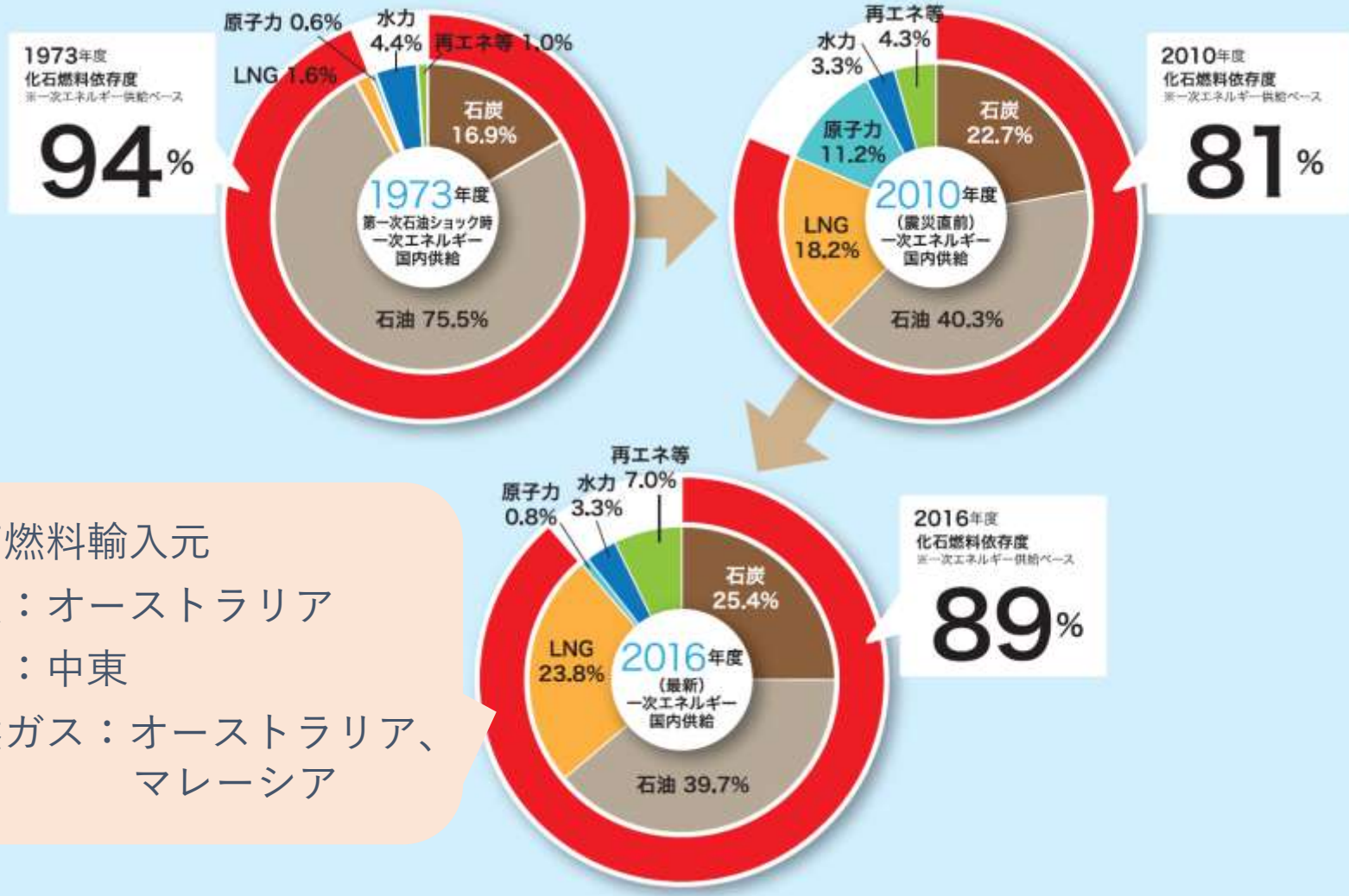
- ✓ 環境破壊
- ✓ 自然災害
- ✓ 伝染病 etc.

トリレンマ：3つのものを同時に実現できないこと

エネルギー自給率



日本のエネルギー源の変遷





出典：関西電力ホームページ、原子力・エネルギー図面集

エネルギーを使い切るまで何年？

50年

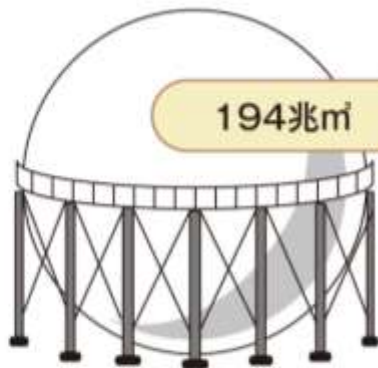
1兆6,966億
バーレル



石油※1
(2017年末)

53年

194兆m³



天然ガス※1
(2017年末)

134年

1兆0,350億トン



石炭※1
(2017年末)

99年

614万吨



ウラン※2
(2017年1月)

世界のエネルギー資源確認埋蔵量

発電と燃料

1 GW（100万kW）の電力を1年間作るのに必要な燃料と設備

石炭



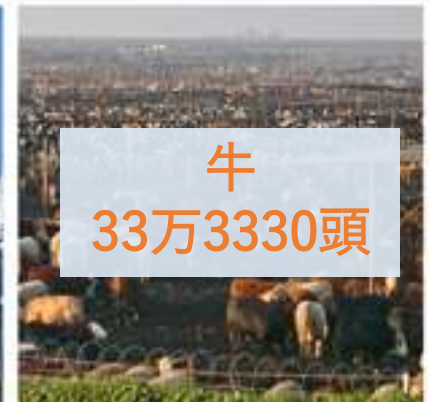
石油



風力



バイオガス



バイオマス



太陽光



原子力

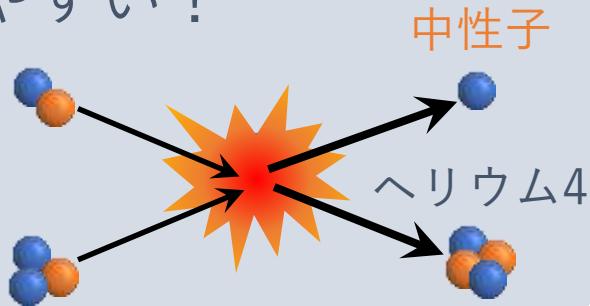


核融合

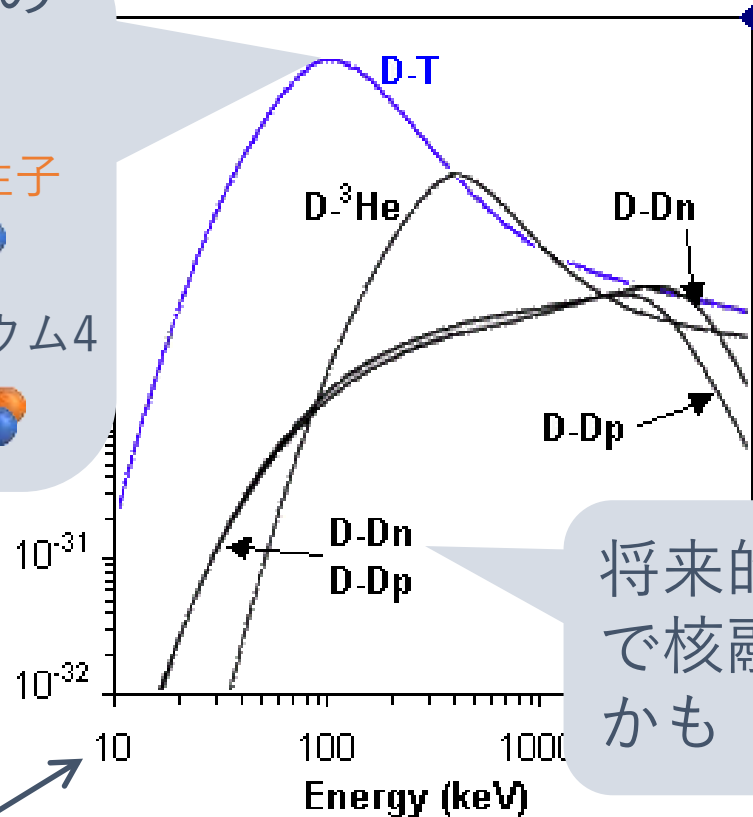


いろいろな核融合反応

重水素と三重水素の
反応が一番起こり
やすい！



反応



エネルギー、つまり温度

p: 陽子



n: 中性子



D: 重水素



T: 三重水素



^3He : ヘリウム3



将来的には重水素だけ
で核融合炉がつかれる
かも！？

10 keV $\div$ 1億度に相当！

核融合炉に必要な資源

- ✓ 核融合に使う燃料：重水素と三重水素

重水素　：海水に0.014 %含まれる。

→ ほぼ無尽蔵。

三重水素：天然にほとんど存在しない。
非常に弱い放射線を出す（半減期12.3年）。

→ 人工的に作る必要がある。

→ リチウムと中性子の反応から生産。

リチウム：海水に0.000017 %含まれる。

→ 1500万年分の資源量。

- ✓ 他に必要な特殊材料：ニオブとベリリウム

→ 7万年程度の資源量。

まとめ：なぜ核融合？

- ✓ 人類は今、3Eのトリレンマに直面している
- ✓ 日本はエネルギーの9割以上を外国に頼っている
危機的状況
- ✓ 化石燃料は温暖化の観点からも使いたくない
- ✓ 原子力の推進は日本ではなかなか難しい
- ✓ 再生可能エネルギーは大規模な設備が必要

**核融合炉は日本、そして人類を
救えるかもしれない！**

1 なぜ核融合？

2 核融合炉のしくみ

3 核融合炉の現在と未来

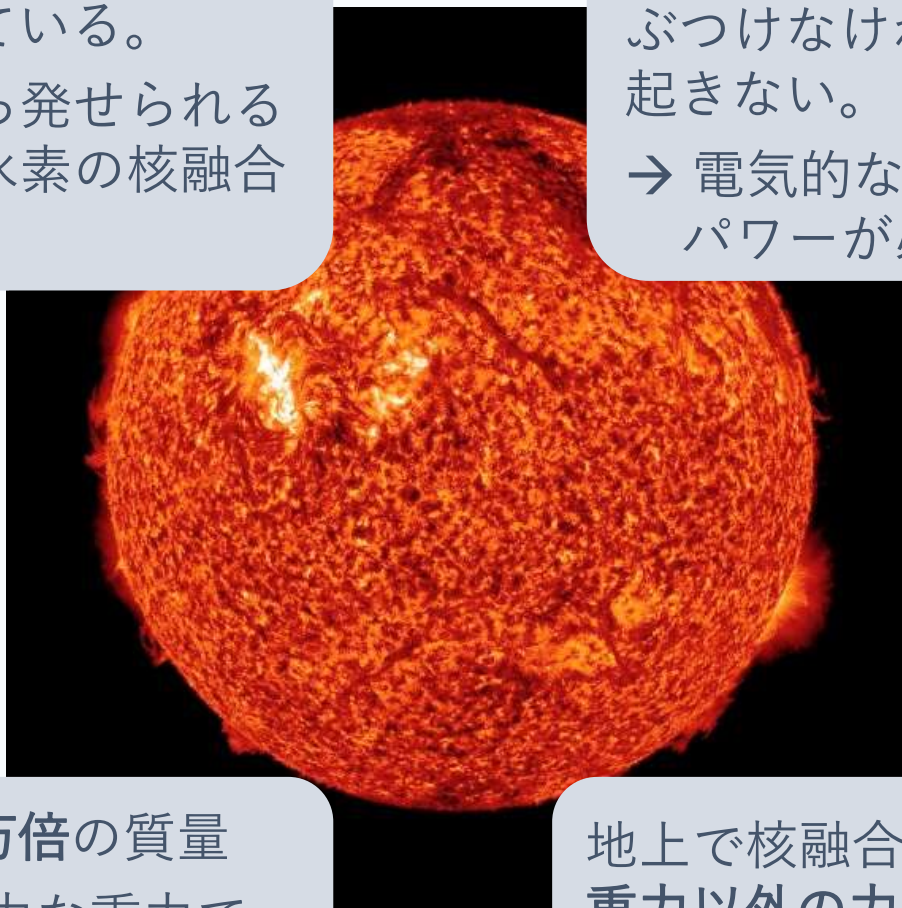
身近な核融合：太陽

宇宙の全原子の90 %以上は
水素で構成されている。

太陽（恒星）から発せられる
エネルギーは、水素の核融合
反応による。

原子核（+に帯電）同士を
ぶつけないければ核融合反応は
起きない。

→ 電氣的な反発に打ち勝つ
パワーが必要。



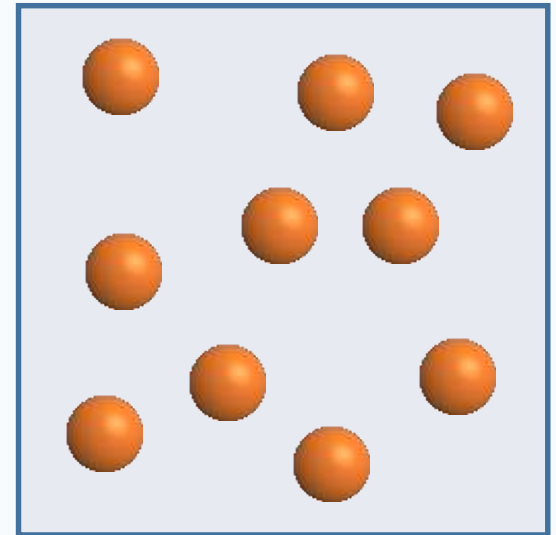
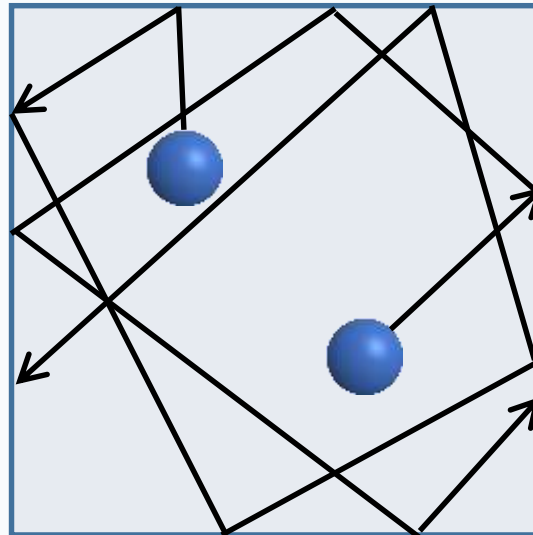
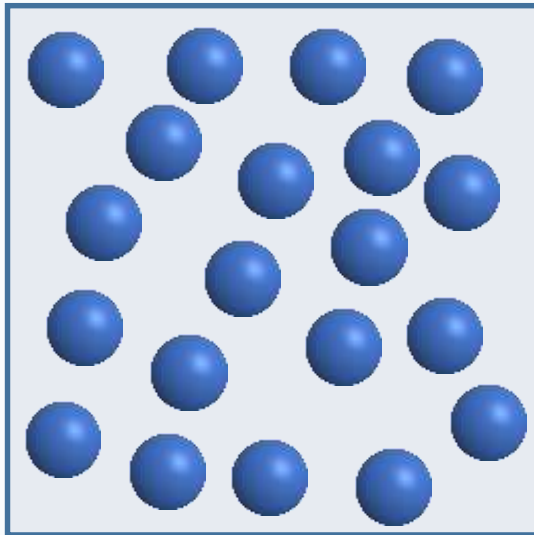
太陽は地球の**33万倍**の質量

→ 中心部では強力な重力で
核融合反応が起きる。

地上で核融合反応を起こすには、
重力以外の力で原子核同士を
ぶつけないければならない。

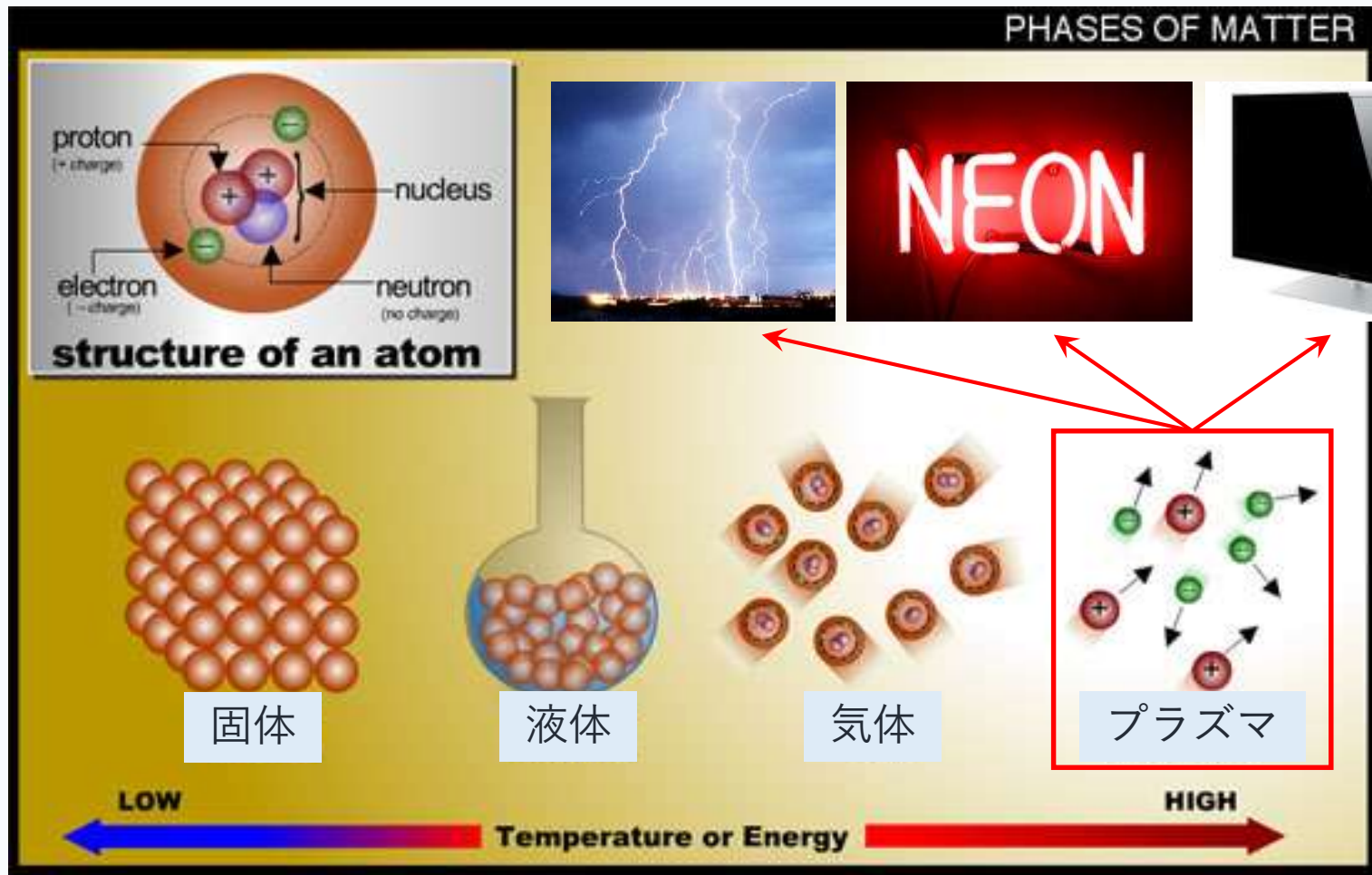
地上の太陽≡恋愛？

1. 出会いがなければ恋愛も始まらない！
→ 人（原子核）の数が多ければ多いほどよい **密度**
2. 恋はあせらず！
→ 時間をかければ出会いの確率が上がる **時間**
3. 情熱はマスト！
→ アツい気持ちで相手にぶつかる **温度**



プラズマ

モノをあたためていくと最終的にプラズマになる。



核融合炉と原子炉の共通点

- ✓ 発見はほぼ同時期。
核融合1932年 核分裂1938年
- ✓ 核反応で発生した高いエネルギーの中性子を熱に変換してエネルギーを得る。
- ✓ 燃料として放射性物質を使う。
核融合炉：三重水素（トリチウム） 原子炉：ウラン

原発と何が違うの？

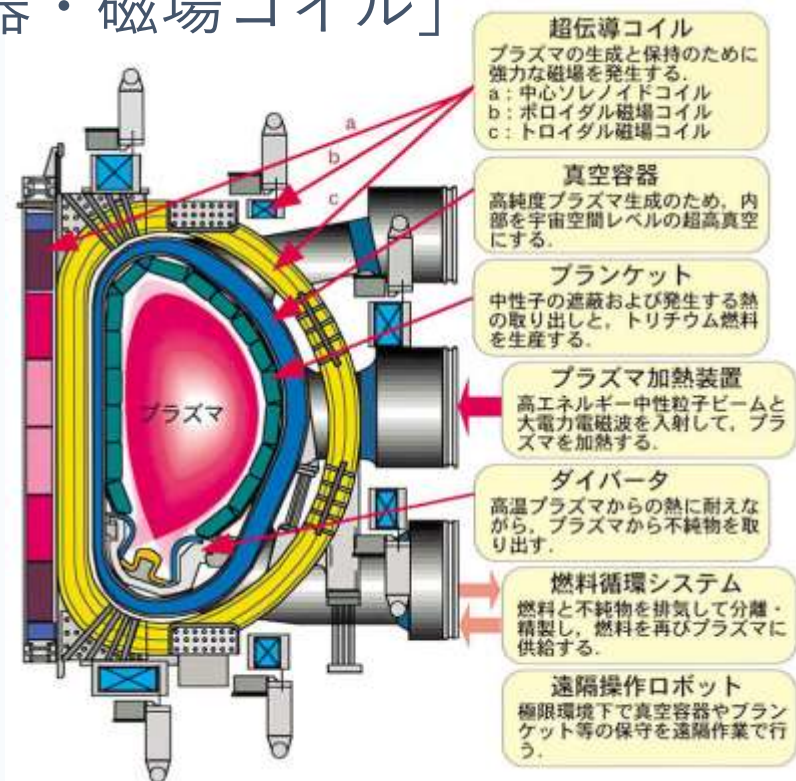
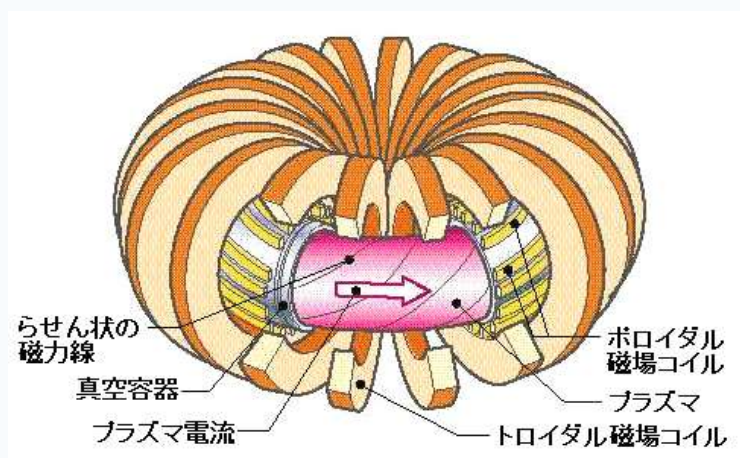
核融合炉と原子炉の違い

	核融合炉	原子炉
実用化	研究段階	1954年
反応	高密度と高温を維持しない限り反応がすぐ止まる	反応が連鎖的に進むため、冷やし続ける必要がある
資源量	ほぼ無尽蔵 海水から回収可能	可採年数約100年 燃料再処理を検討
高レベル 放射性 廃棄物	発生しないように 使用する材料を限定 100年でリサイクル可に	発生 埋設地の選定が難航

核融合炉の形式

(1) 磁場閉じ込め方式：プラズマを磁力線に巻きつける。

① トカマク型：3種類のコイルでドーナツ型の磁場をつくる
Tokamak:ロシア語「電流・容器・磁場コイル」

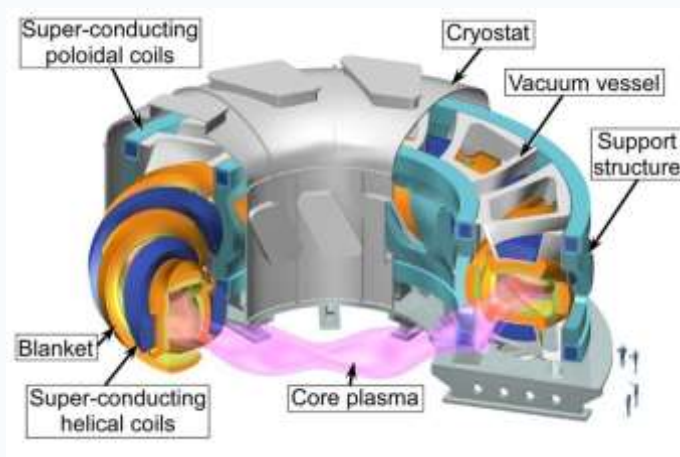


出典：原子力百科事典 ATOMICA「トカマク型核融合装置の研究開発」
日本原子力研究開発機構「核融合炉を目指して～核融合研究の進展～」第4章
ITER Newsline No.200

核融合炉の形式

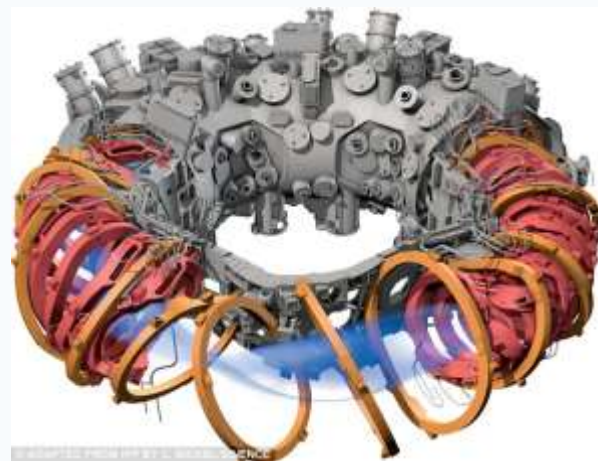
②ヘリカル型：ねじれた磁場をつくる

ヘリオトロン（日本）



核融合科学研究所FFHR

ステラレーター（欧米）



マックスプランクプラズマ物理研究所
ヴェンデルシュタイン7-X



核融合炉の形式

(2) 慣性閉じ込め方式：レーザー等を四方八方から当てて、燃料を圧縮して高温高压にする。



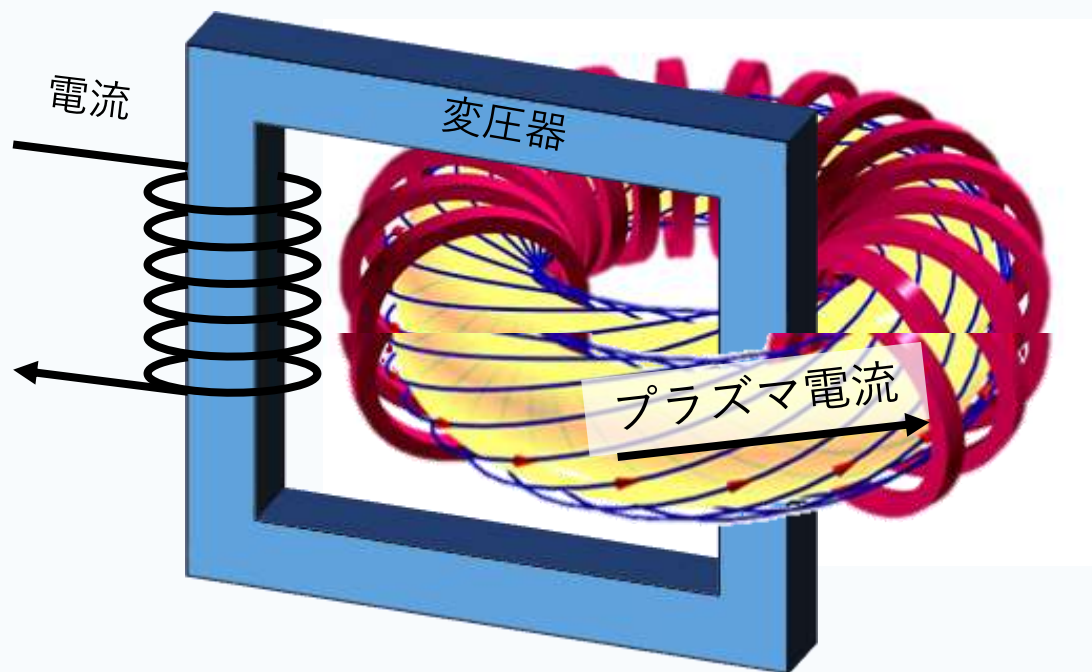
ローレンス・リバモア国立研究所 National Ignition Facility (NIF)

磁場閉じ込めプラズマの加熱方法

1. プラズマ電流

プラズマ内に電流を流すことで抵抗で加熱。

→ 電熱線と同じ原理

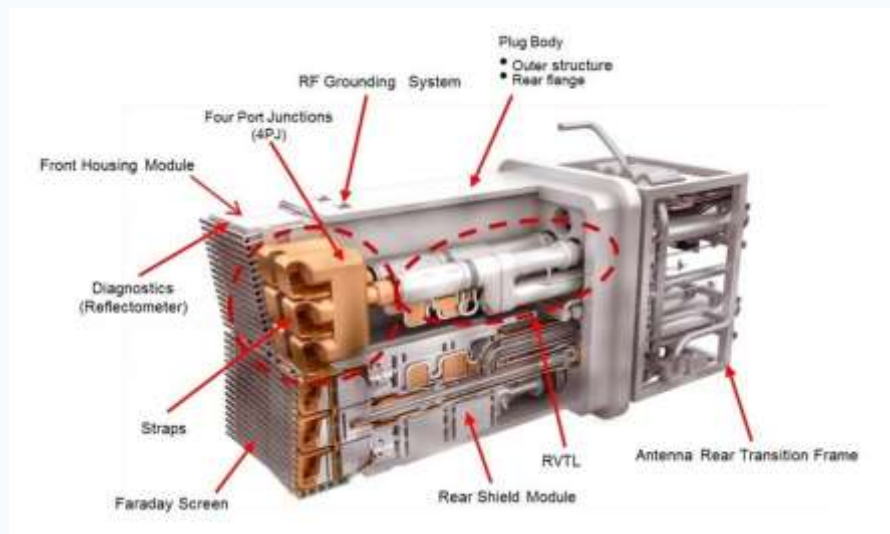


磁場閉じ込めプラズマの加熱方法

2. 高周波加熱

電磁波で電子を共鳴させて加熱。

→ 電子レンジの原理

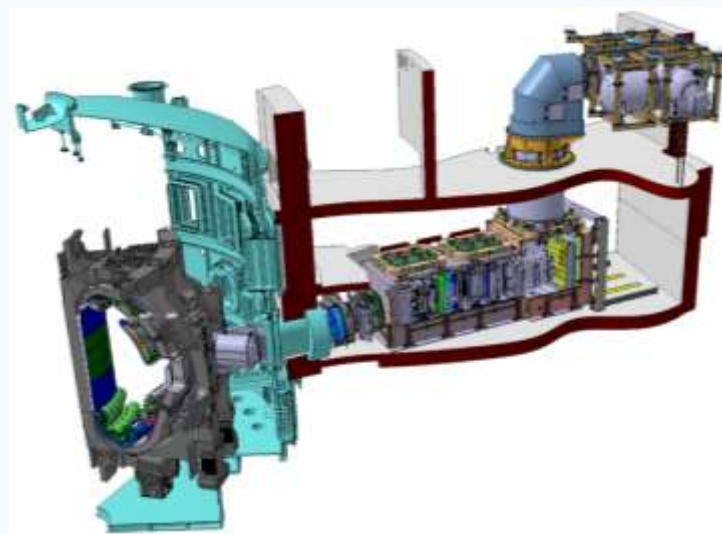


電子サイクロトロン共鳴加熱装置

3. 中性粒子加熱

高エネルギーの粒子を入射。

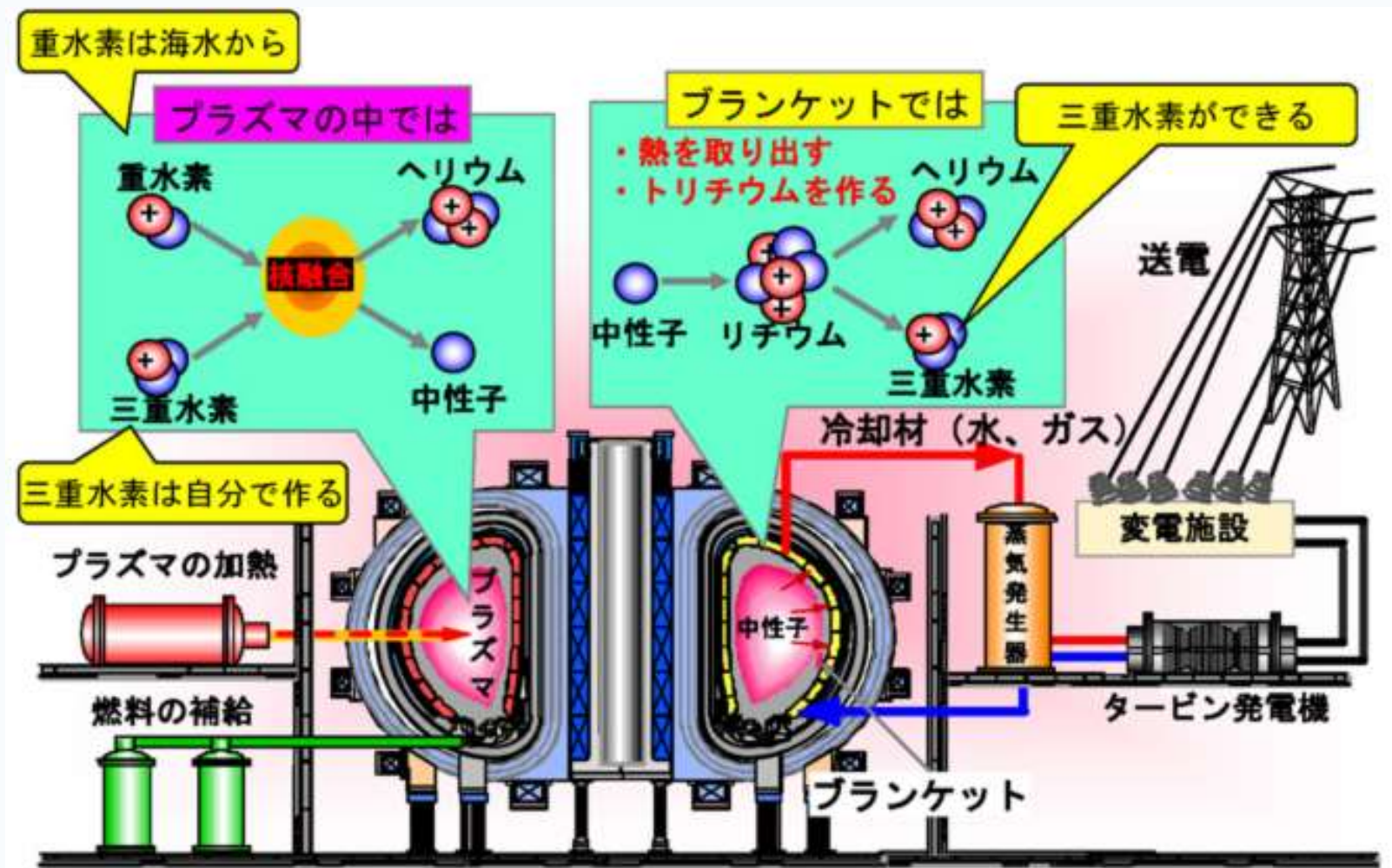
→ 水にお湯を注ぐ



中性粒子加熱装置

核融合炉の燃料システム

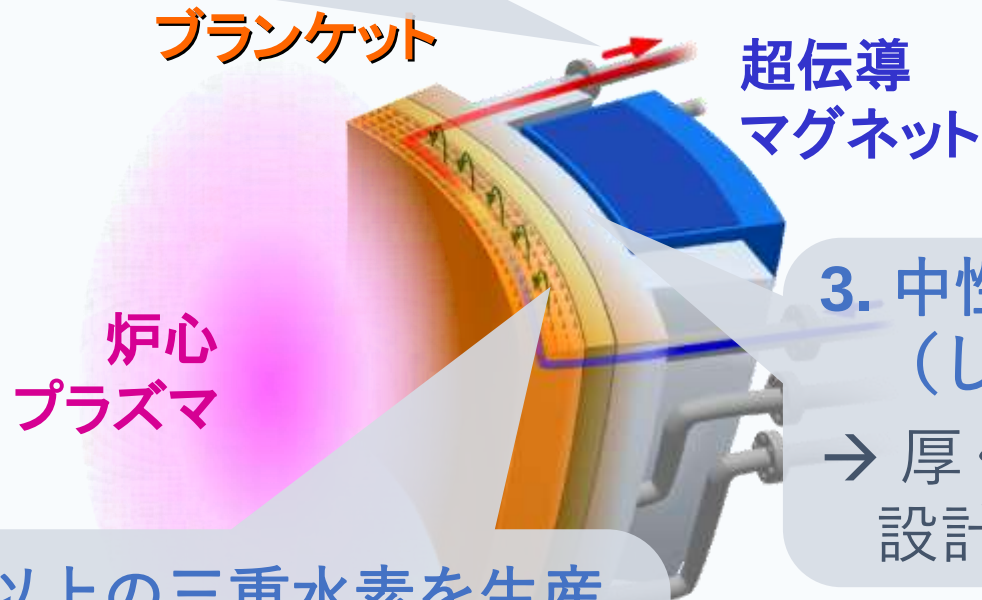
三重水素はブランケットでリチウムと中性子の反応で再生産



ブランケットの役割

1. 中性子のエネルギーを熱に変換

→ 冷却材（ガスや液体）を流す



2. 消費した以上の三重水素を生産

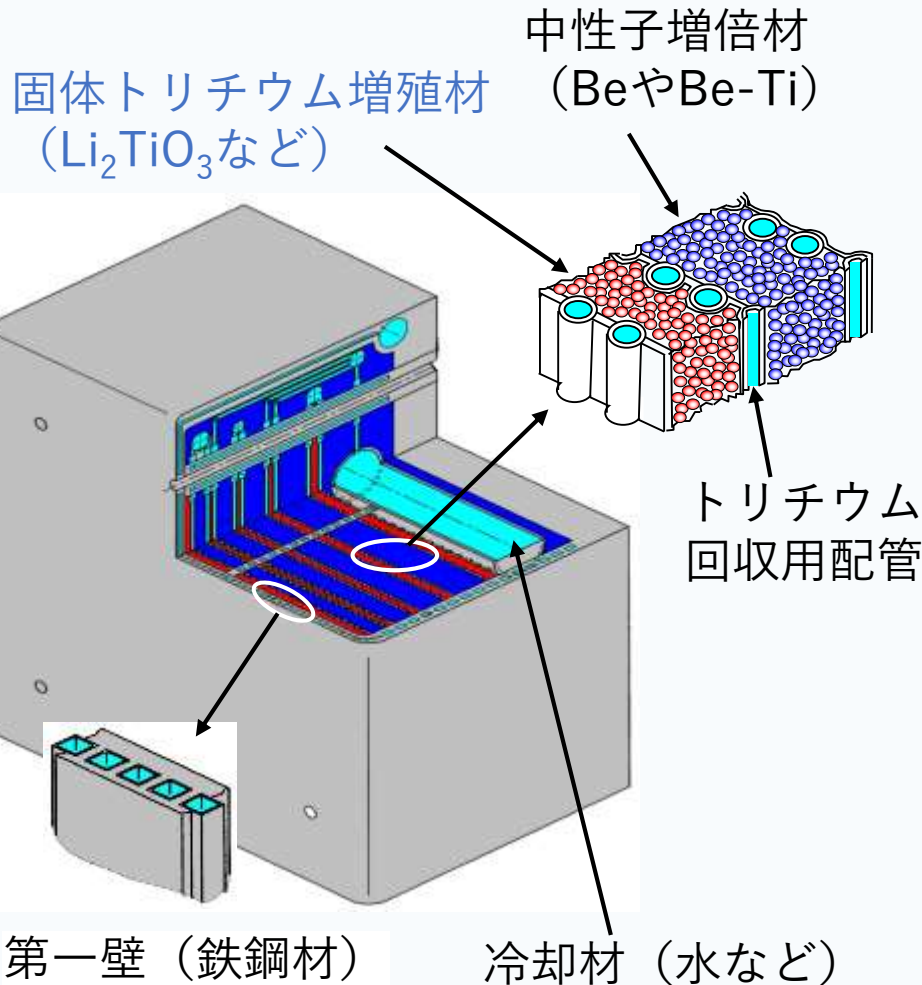
→ リチウムを含む物質
（固体や液体）を設置
生産した三重水素を回収

3. 中性子の遮蔽
（しゃへい）

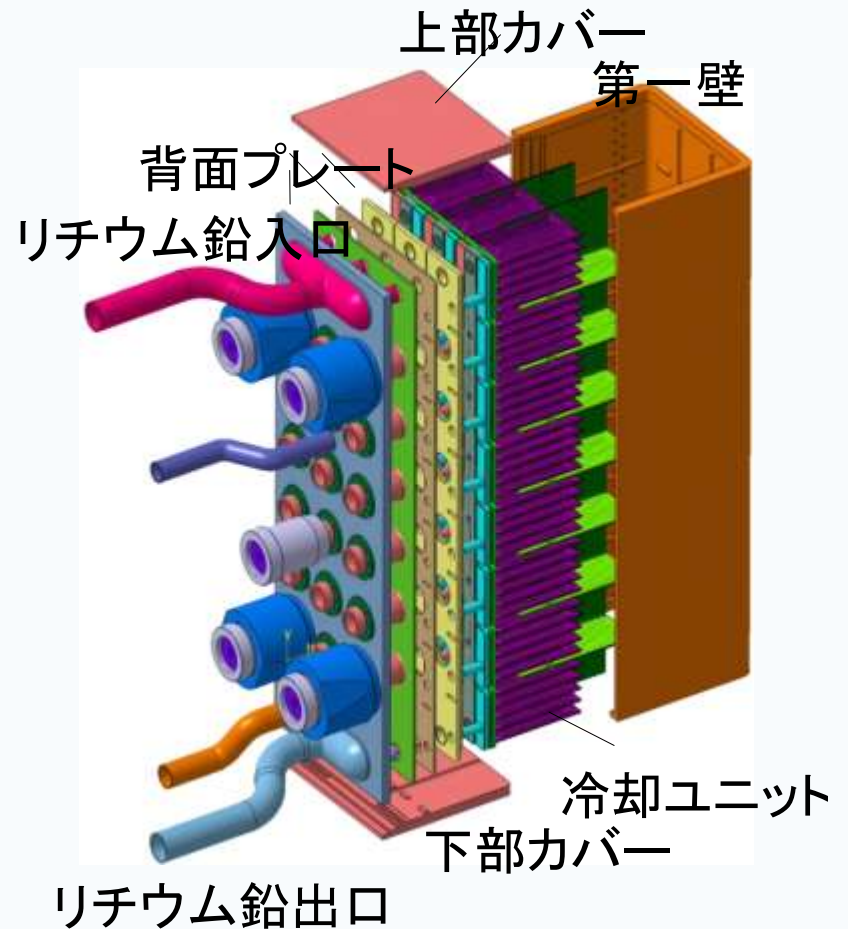
→ 厚くしたいが、
設計上限界がある

ブランケットの種類

固体ブランケット



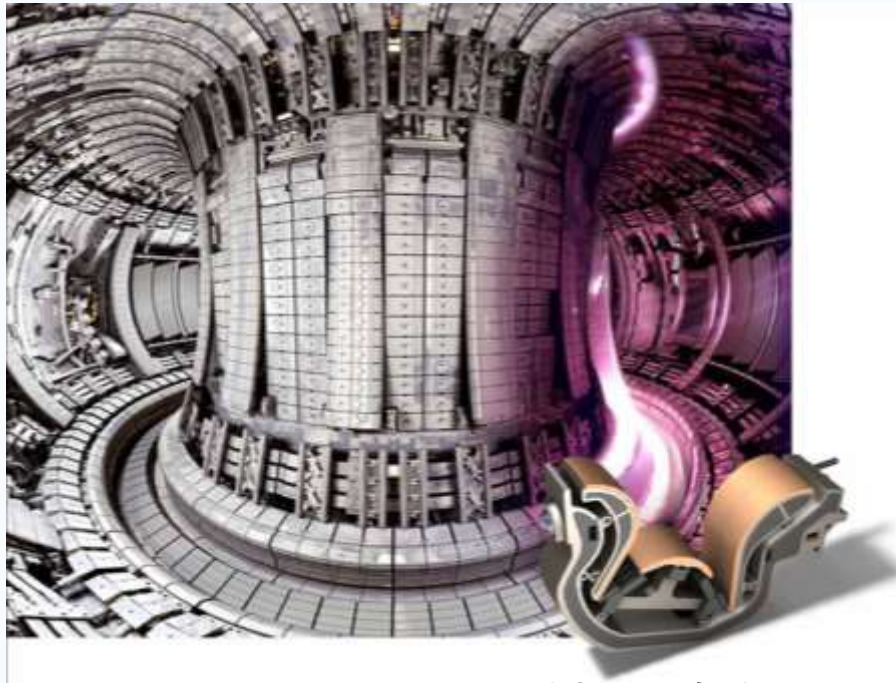
液体ブランケット



ダイバータの役割

核融合炉を運転していると、核融合した後の「ゴミ」や不純物がどんどん容器内にたまっていってしまう。

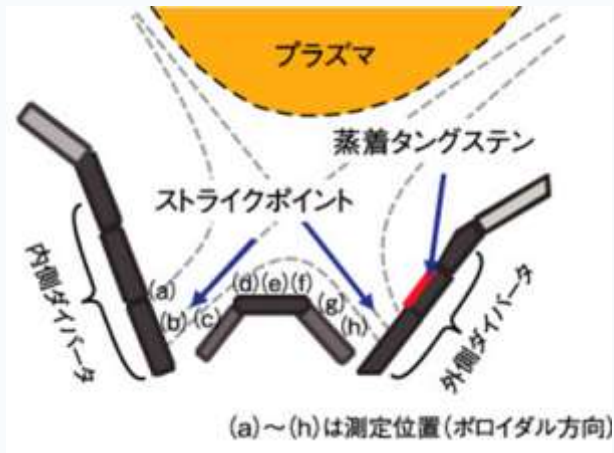
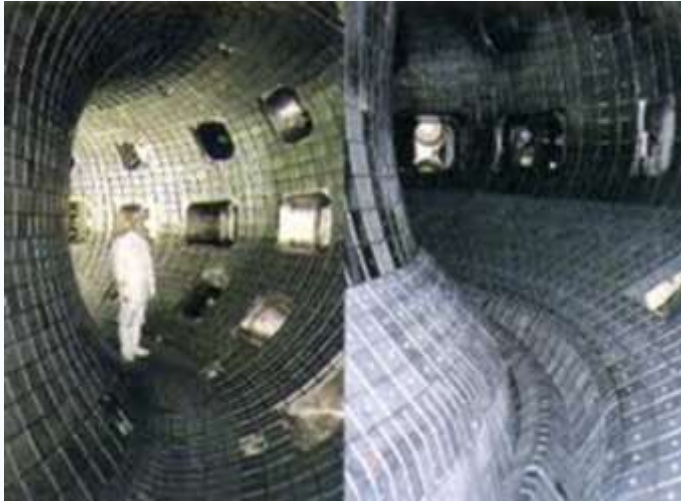
→ ダイバータで排出し、プラズマをきれいに保つ。



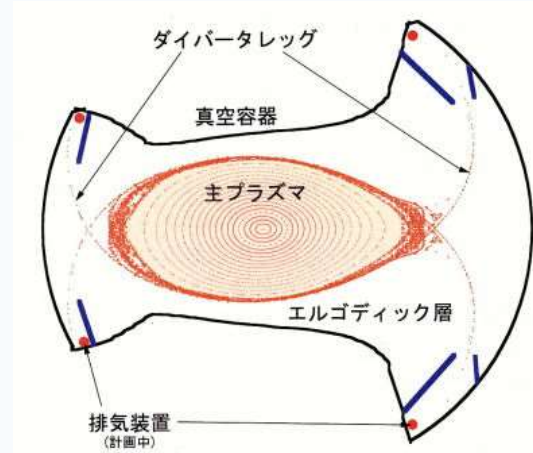
高温の粒子が大量に衝突する、核融合炉で一番熱い機器。

→ 熱に強い材料が必要。

ダイバータのデザイン



JT-60（茨城県那珂市）のダイバータ



LHD（岐阜県土岐市）のダイバータ



まとめ：核融合炉のしくみ

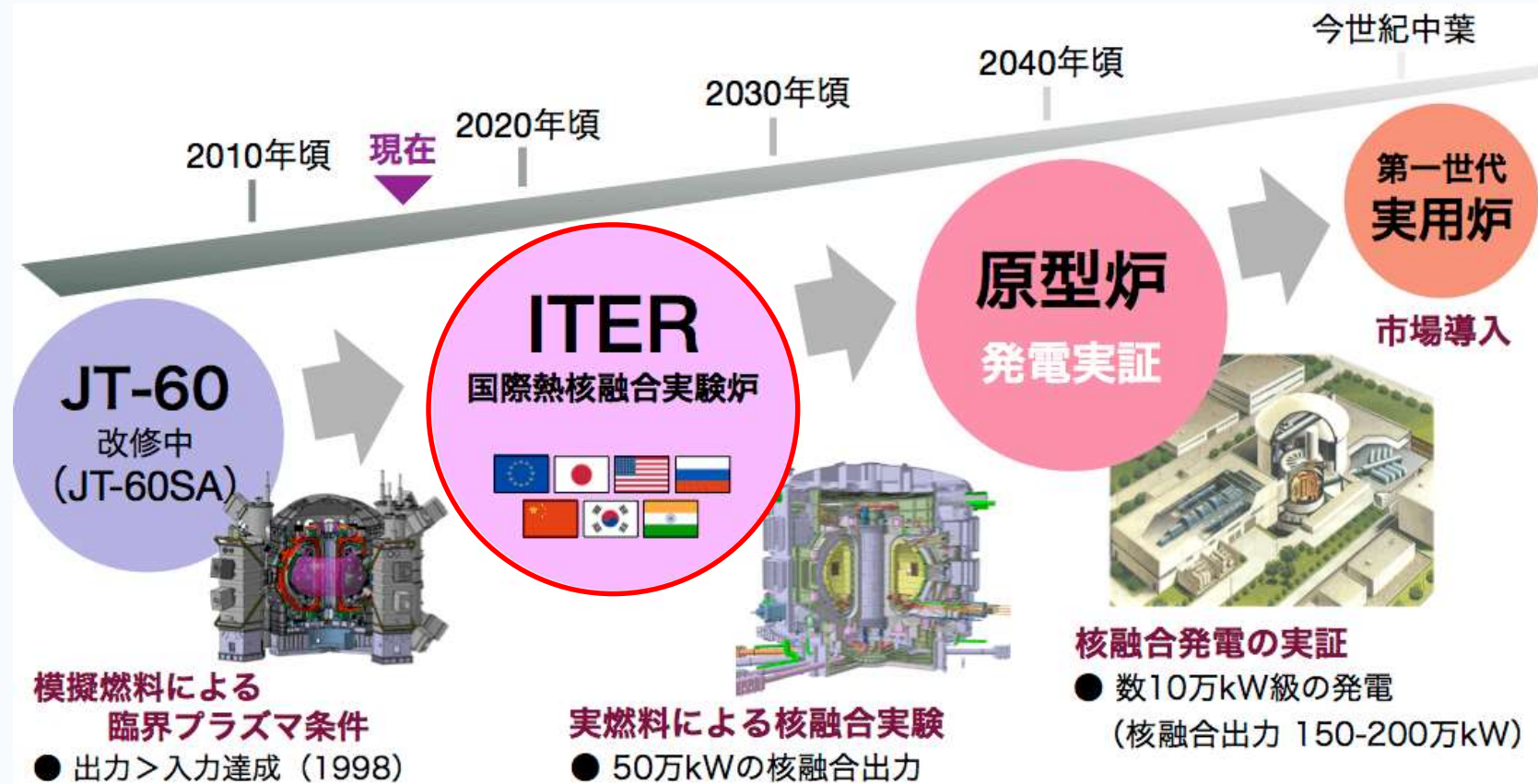
- ✓ 地上に太陽をつくるには、重水素と三重水素をプラズマにしてぶつける必要がある。
- ✓ 安定的な核融合を起こすためには、密度、時間、温度が大切。（恋愛と同じ！？）
- ✓ 核融合を起こすには、プラズマを磁石の力で閉じ込める方法や、レーザーで燃料を一気に圧縮する方法が現在研究されている。
- ✓ 世界の主流であるトカマク方式には、超伝導コイル、加熱装置、ブランケット、ダイバータなどの機器があり、使う材料に応じて様々なデザインがある。

1 なぜ核融合？

2 核融合炉のしくみ

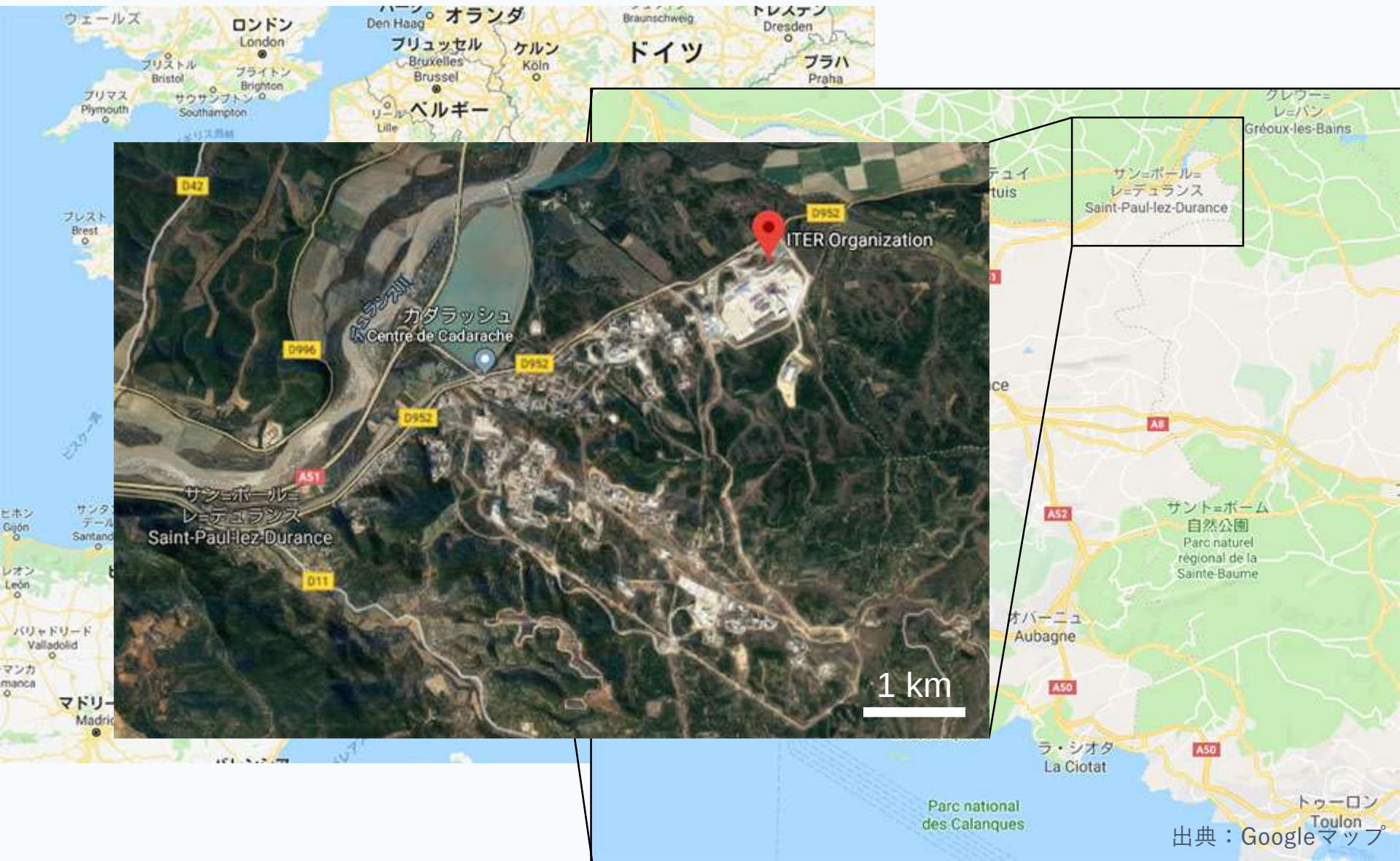
3 核融合炉の現在と未来

日本の核融合開発計画



ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

ITERはどこ？



ITERを見てみましょう！

<https://www.iter.org/>

ITERプロジェクトのはじまり



ITER協定等の署名風景
(2006年11月21日、パリ・エリゼ宮)

- 1985年、米ソ首脳会談でレーガン大統領とゴルバチョフ書記長が核融合エネルギー実用化のための国際協力について合意。
- 2005年6月28日、ITERが南フランスに建設されることが満場一致で合意。
(フランス・サン＝ポール＝レ＝デュランスと青森県六ヶ所村で最後まで誘致合戦を繰り広げていた。)
- ITER機構加盟7極は世界人口の50 %とGDPの85 %を占める。

China EU India Japan Korea Russia USA

どこが何を作る？

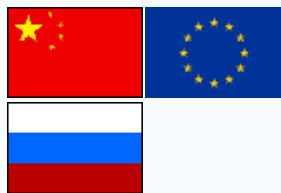
供給装置 (31)



トロイダル磁場コイル (18)



ポロイダル磁場
コイル (6)



補正コイル(18)



中央ソレノイドコイル (6)



ダイバータ



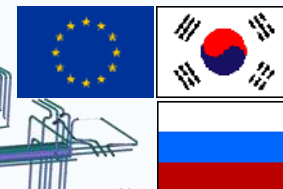
クライオスタット



断熱装置



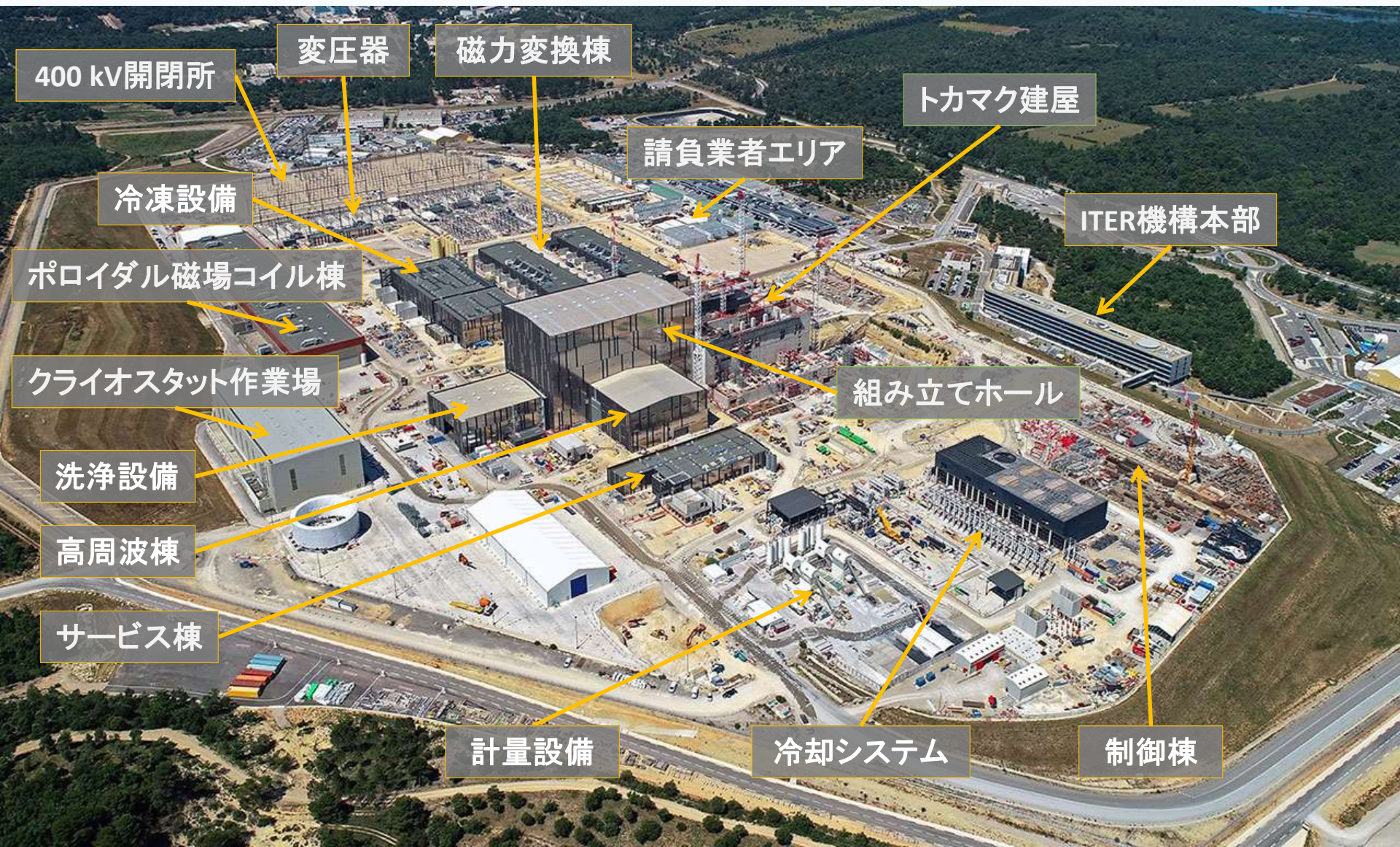
真空容器



ブランケット



ITERサイトの状況（2019年6月）



トカマク建屋（2016年）



トカマク建屋（2019年）



組み立てホール

装置を設置する前に、構成機器を予備的に組み立てるためのホール。面積6,000 m²、高さ60 m。中には1,500トンまでのものを運べる移動式クレーンが備えられている。



組み立てホール内部



容量750トンのクレーン2組の設置風景

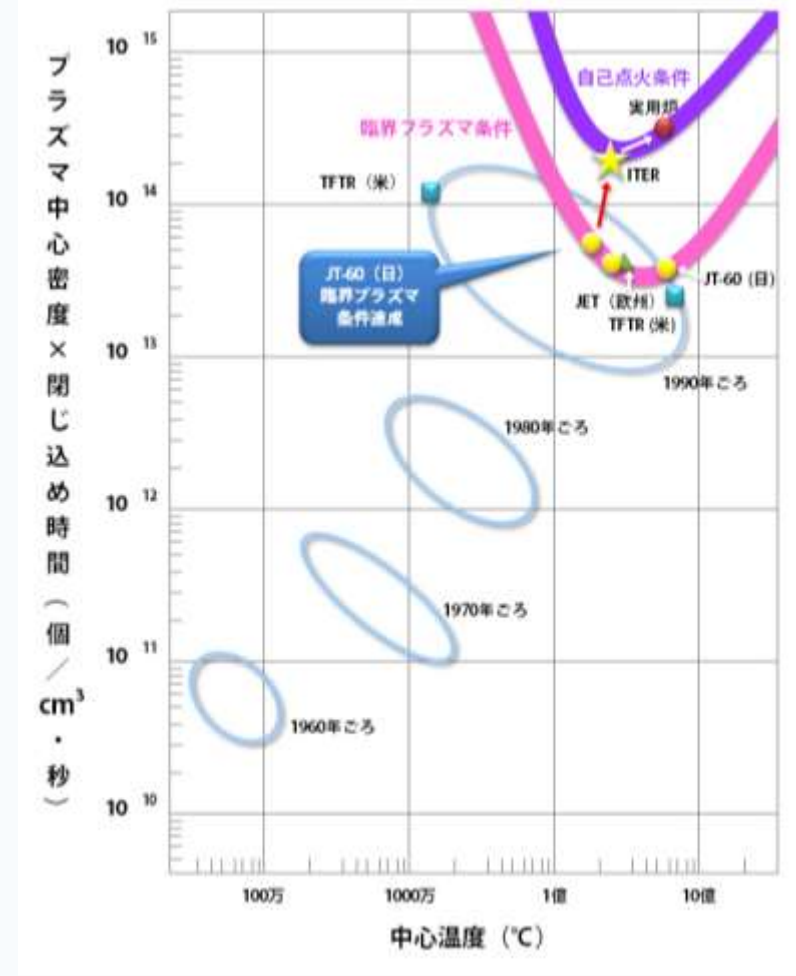
輸送計画

大型の機器や部品は船便でマルセイユ港に入り、ITERまで陸上輸送している。

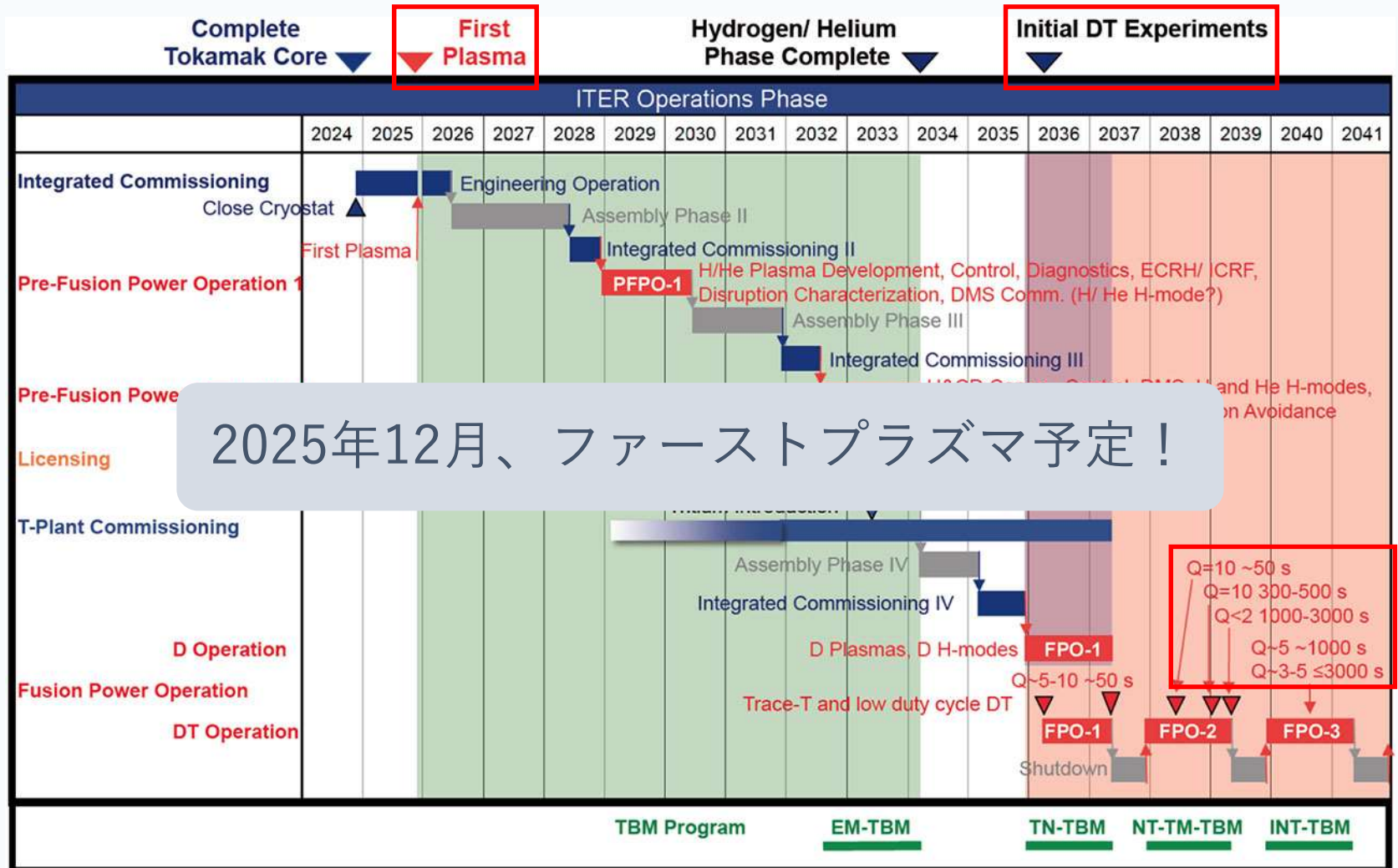


ITERの目標

1. 500 MWの出力（投入したエネルギーの**10倍**）で400秒のプラズマ維持
2. 核融合炉としての運転実証
3. 重水素－三重水素の定常燃焼
4. 三重水素増殖試験
5. 核融合炉の安全特性実証



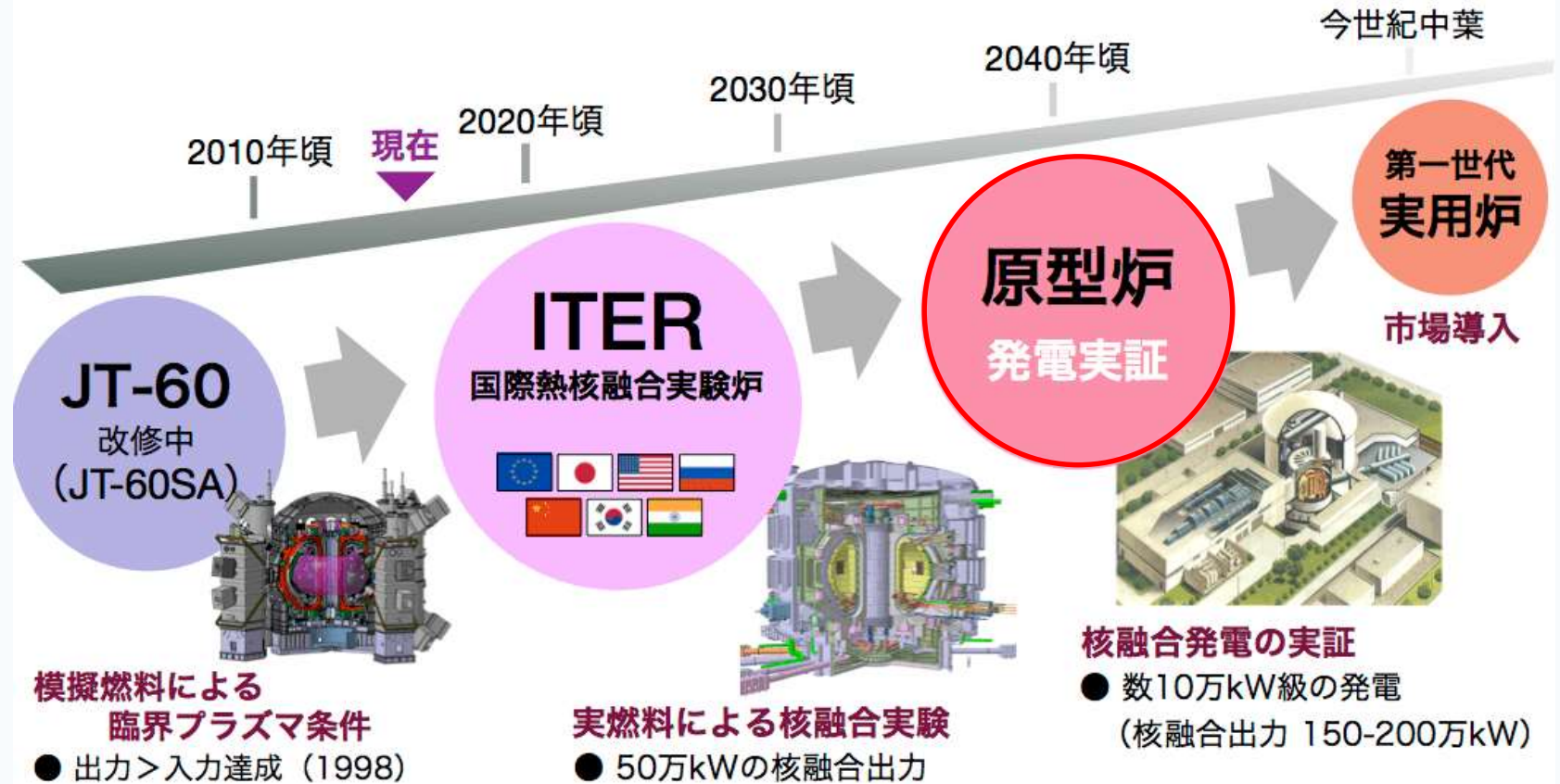
ITERのスケジュール



核融合発電炉の実現に向けて

- ITERの主目的は核融合プラズマの実証。
→ 実用化に向けて解決する課題が残されている。
- ITERでは取り扱わない課題
 - ✓ 安定的な発電
 - ✓ 実用化に向けた運転・保安技術の開発
 - ✓ 燃料となる三重水素の自給自足 } 原型炉で解決！
- ✓ 高エネルギー中性子に耐える材料の開発
→ 核融合中性子照射施設の設計、建設！
- ✓ ヘリカル型核融合炉の開発 → 核融合科学研究所
- ✓ 慣性閉じ込め（レーザー）方式核融合炉の開発
→ 大阪大学レーザー科学研究所

日本の核融合開発計画



ITERの実験成果を活かして各国で原型炉を設計、建設予定

日本の原型炉研究開発体制



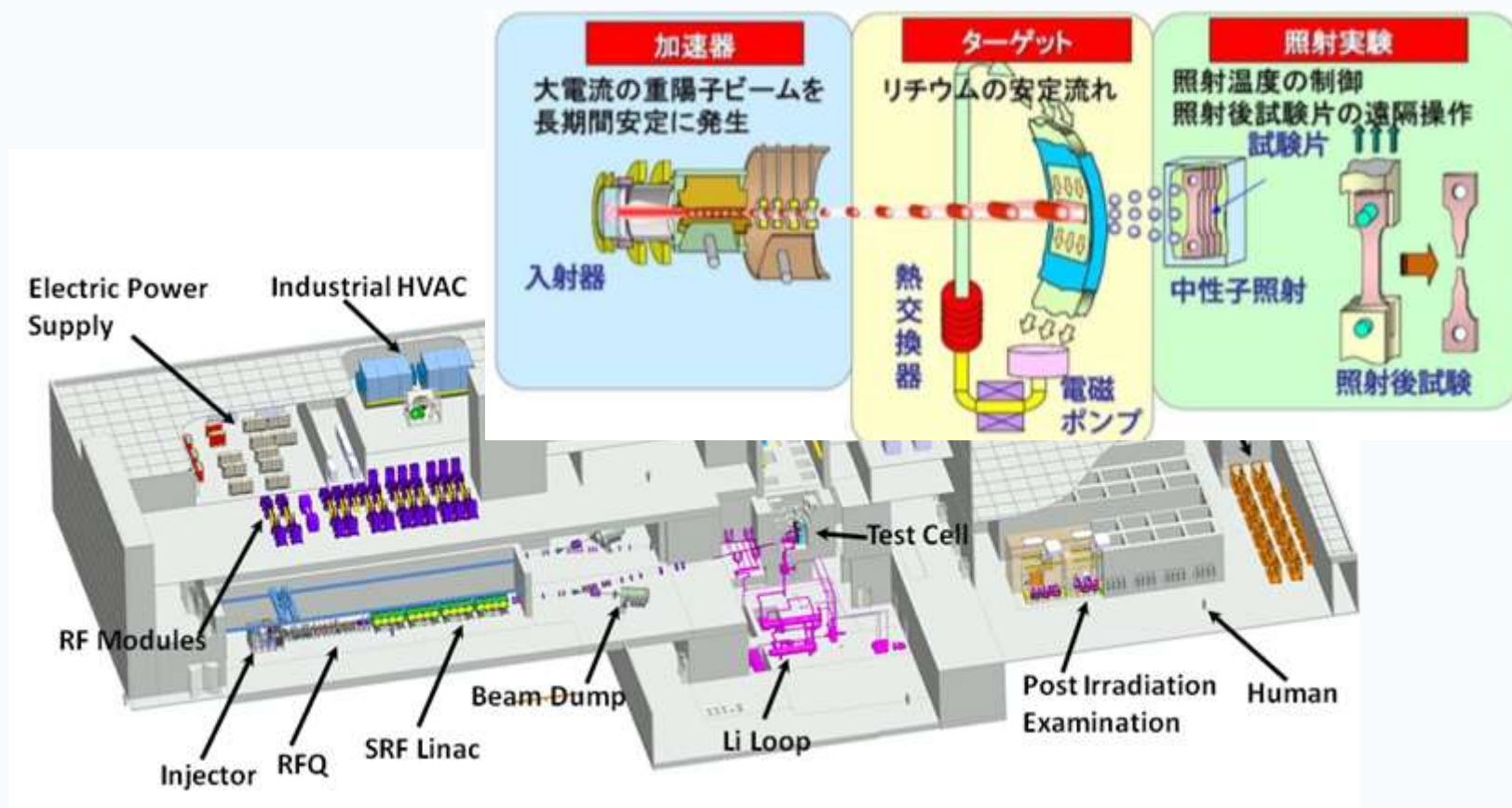
QST 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構（略称：量研）
トカマク型の核融合研究を進める国立研究所

NIFS 自然科学研究機構 核融合科学研究所（略称：核融合研）
ヘリカル型の核融合研究を進める大学共同利用機関

国際核融合材料照射施設：IFMIF

核融合炉で想定される材料へのダメージを模擬できる実験施設は世界に存在しない。

→ 専用の施設が必要！



核融合炉と三重水素

□ ITER

ミッション：核融合プラズマの長時間定常運転

三重水素：最大**2 kg**程度

□ 原型炉

ミッション：発電実証、炉システムの健全性評価

三重水素：**10 kg**程度

□ 実用炉（1 GW電気出力、燃焼率が5%の場合）

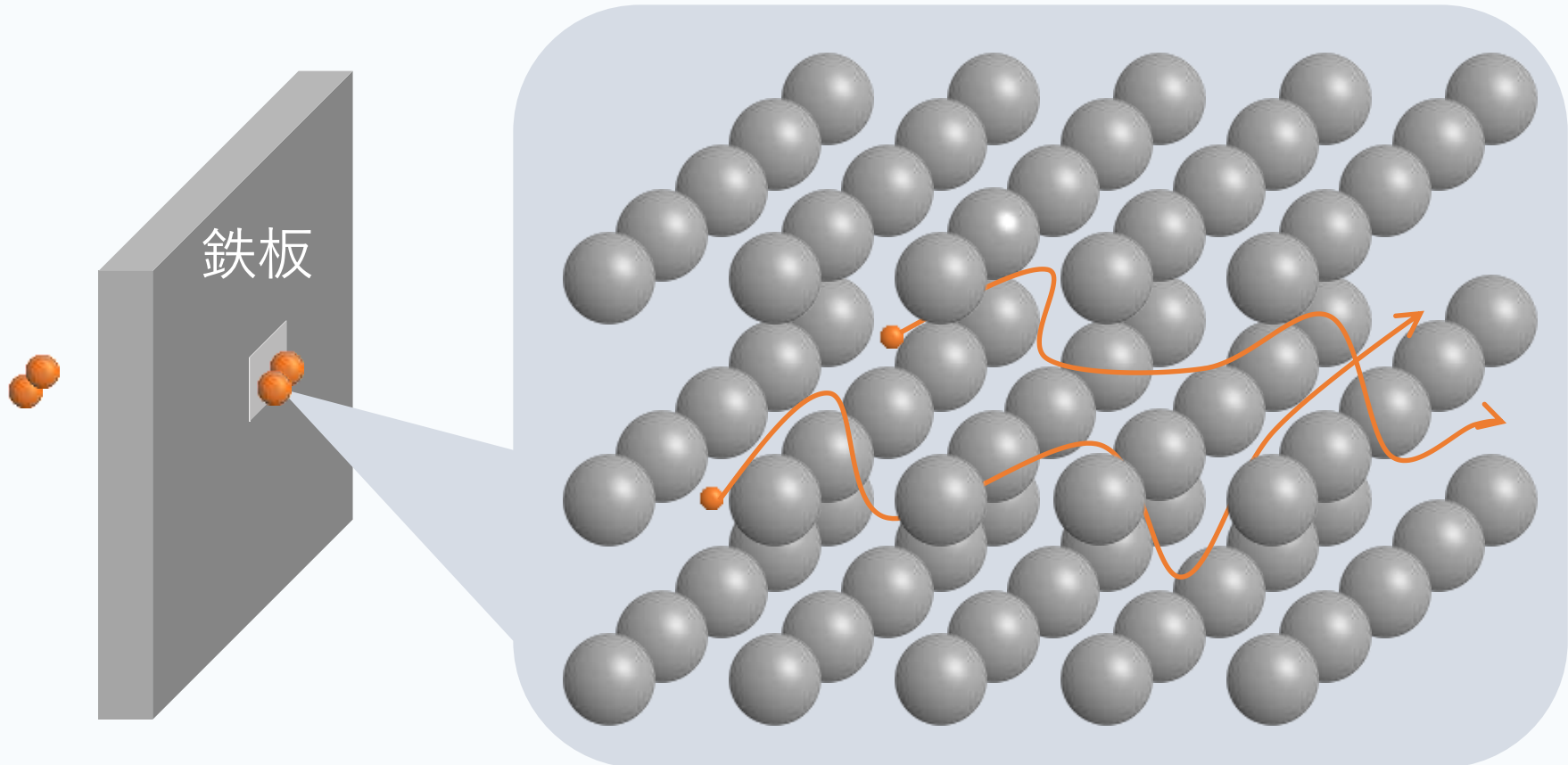
三重水素：1日の消費量**500 g**

1日の循環量**10 kg**

核融合炉開発では、人類が扱ったことのない大量の三重水素を安全に管理することが最重要課題の一つ！

近田研究室の活動紹介

ぎっしり詰まっているように見える金属の中でも、
水素はとても小さいため素早く通り抜けることができる。

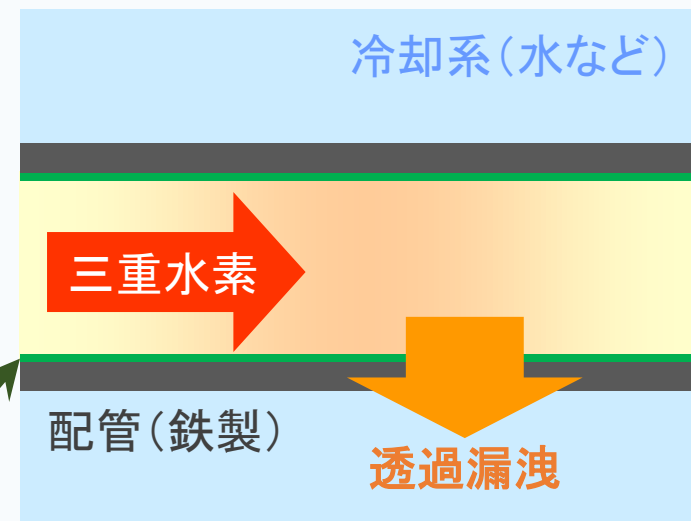


近田研究室の活動紹介

重水素と三重水素が金属配管をすり抜けて炉外に出てしまう。特に三重水素は貴重かつ放射性物質なので、外に漏れると核融合炉が成り立たない！

水素を通しにくい薄い膜

- ✓ どんな膜がいい？
(材料／厚さ／つくり方)
- ✓ 膜は高温のガスや液体、高エネルギーの中性子にさらされても大丈夫？



水素の通しにくさ
世界No.1の膜を開発し、
現在も記録保持中！

核融合炉などで役に立つ「強い膜」の研究

研究室の日々を公開中！

[HOME](#) [ABOUT US](#) [RESEARCH](#) [ACHIEVEMENT](#) [LECTURE](#) [MEMBER](#) [CONTACT](#) [LINK](#)



<https://wwp.shizuoka.ac.jp/chikadalab/>
または「近田研究室」で検索！

LATEST POST

7月25日 (木) マサチューセッツ工科大学で講演します！

Posted on 2019/07/19 by Chikada

いよいよ来週に迫ってきたので再度お知らせします！

静岡大学理学部が主催しているサイエンスカフェ in 静岡で近田が講演します。ポスターは静岡大学ホームページのイベント情報からご覧になれます。

一般の方に知っていただく機会はとても貴重なので、ここ数週間、念入りに準備してきました。核融合と核融合炉の研究開発について、少しでも知っていただき、また興味を持っていただけると幸いです。ぜひお問い合わせの上、お気軽にお越しください！

へようこそ！

当研究室では、核融合炉や水素燃料電池など、次世代エネルギーシステムを支える機能性材料の研究開発に取り組んでいます。

WHAT'S NEW

- ① 7月25日 (木)、サイエンスカフェ in 静岡で講演します！ 2019/07/19
- ② 研究室ツアー 2019/06/18
- ③ 研究室合宿 2019/05/13



Search

まとめ：核融合炉の現在と未来

- ✓ 現在フランス南部にITERが建設中。過去に例のない巨大国際プロジェクトとして、2025年12月のファーストプラズマに向けて急ピッチで作業が進められている。
- ✓ 一方、実用化に向けては、燃料サイクルの確立や材料の耐久性など、解決しなければならない課題が残っており、原型炉や中性子照射施設の設計が産学官のオールジャパン体制で進められている。
- ✓ 三重水素の管理技術は実用化の鍵であり、研究室ではその一端として水素の漏洩を抑える膜の研究を進めている。

おわりに

- かつては「夢のエネルギー」だった核融合炉が、いま現実のものとして人類の役に立つ日を見据えて研究開発が進められていることを、この講演で少しでも知っていただけたら幸いです。
- 資源に乏しい日本が核融合炉の開発を進めていくには、みなさん一人ひとりのご理解とサポートが必要不可欠です。今日を機に、（より一層）応援していただけたら存外の喜びです。
- 実用化に向けて、次の世代のみなさんが一人でも多く核融合炉の研究に興味を持ち、いつか仲間になってくれることを願っています。