

核融合のギモン まとめて答えます

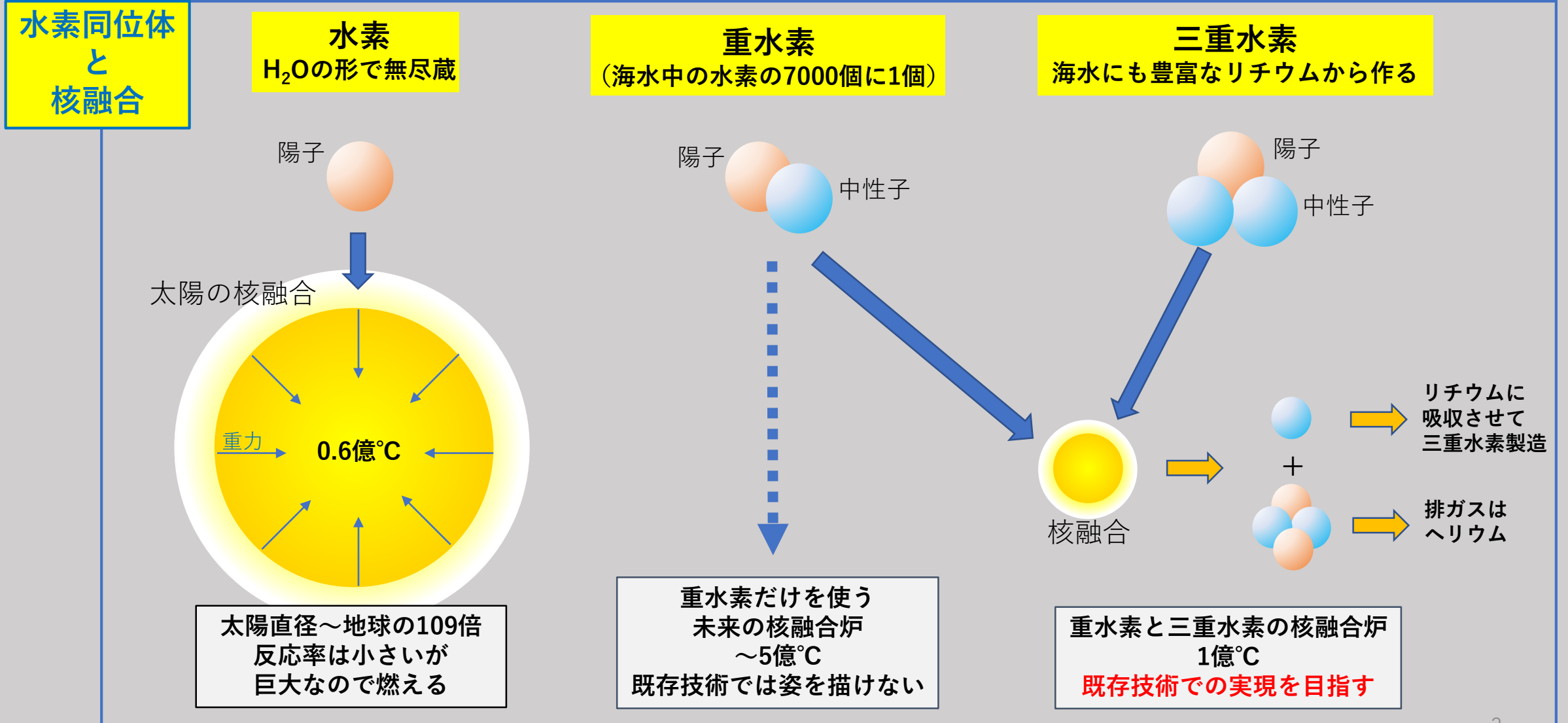
岡野邦彦×杉山大志



まずは核融合の
キホンを3分で復習
知っている人は飛ば
してください

核分裂	重い元素 （ウランなど）の分裂でエネルギー発生	⇒ 分裂後は 様々な元素 （放射性物も）
核融合	軽い元素 （水素など）の融合でエネルギー発生	⇒ 融合後は 特定の元素 （He等）

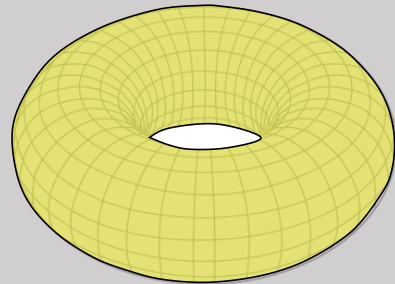
（核融合技術の詳細は、前回のビデオ「核融合は手が届くところにある」参照）



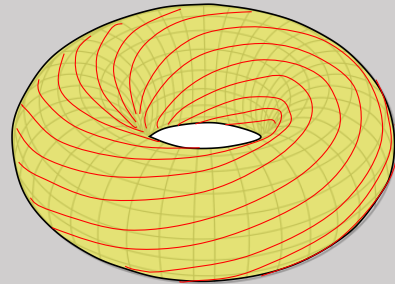
磁場や慣性で1億度のプラズマを閉じ込める

磁場方式

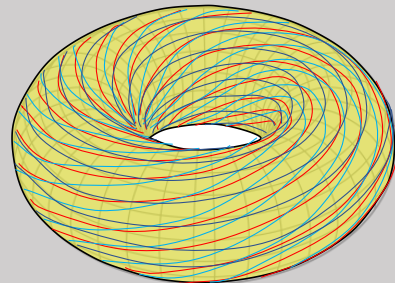
プラズマが磁力線を横切れないのを利用
ねじれピッチが異なる磁力線の
「多重カゴ」で覆って漏れを防ぐ



トーラス
プラズマ

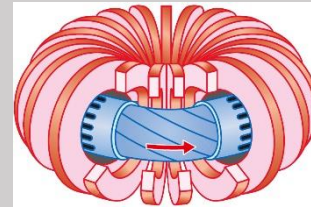


一重の
磁力線カゴ
隙間から漏れる

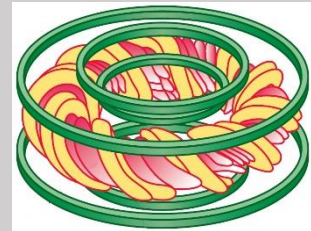


多重の
磁力線カゴ
この図は3重
実際は無限重

磁場方式核融合炉
2つの磁場のねじり方
直径10~20メートル



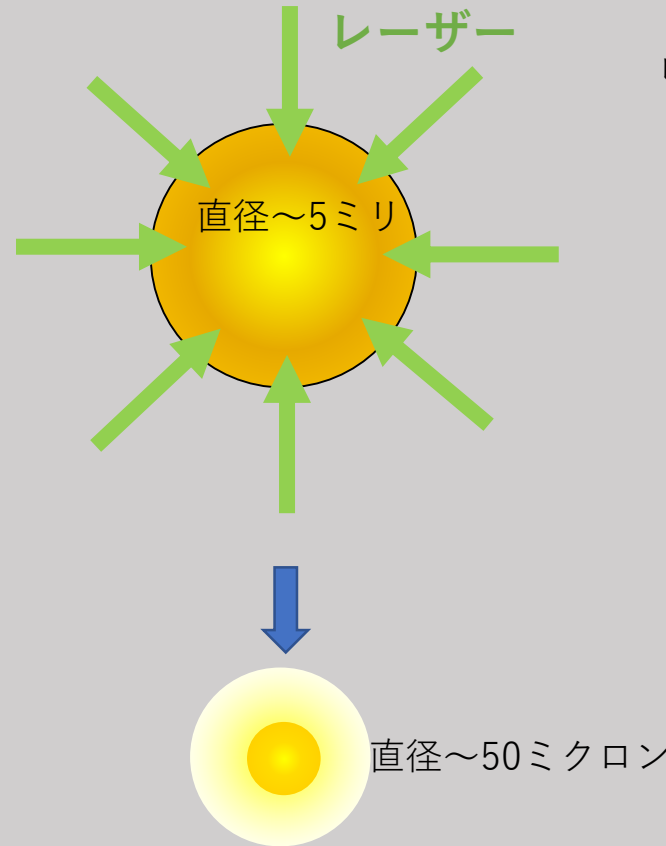
↑電流を流してねじる
または
↓コイルをねじっておく



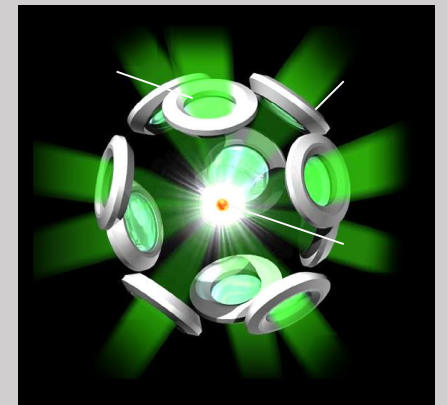
装置イメージ図は「核融合エ
ネルギーのきほん」(誠文堂
新光社刊、2021年)による

慣性方式 (～レーザー方式)

数ミリの燃料球をレーザー等で瞬間加熱+圧縮
質量があるのですぐには飛び散れない(慣性効果)
100億分の1秒で核融合⇒それを繰り返す



レーザー方式核融合炉のイメージ



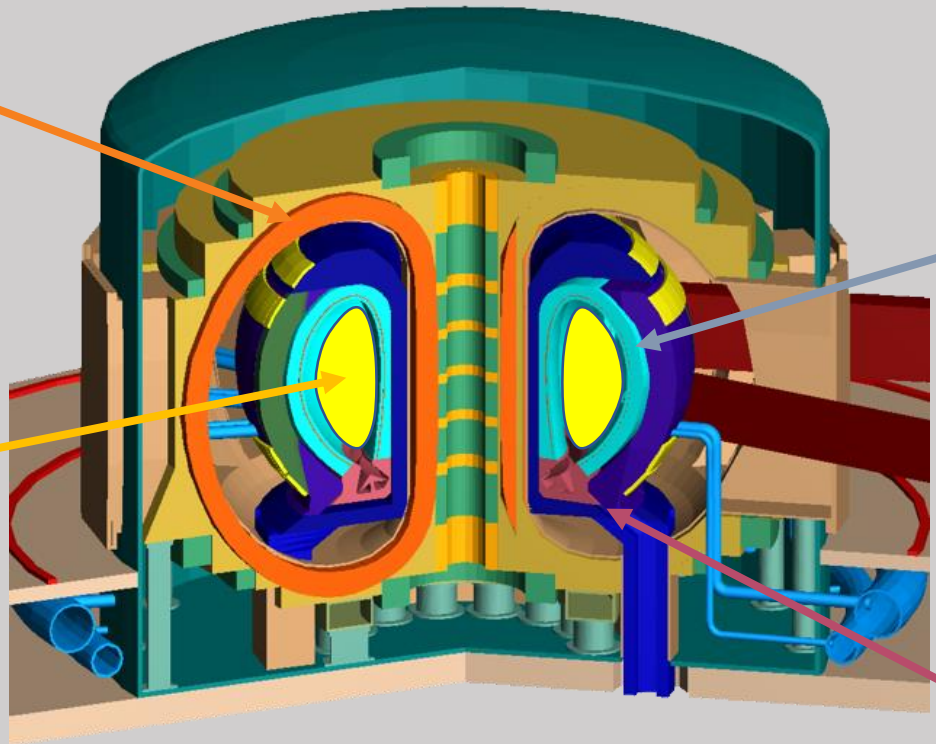
大阪大学レーザー科学研究所

核融合炉はどこが難しいのか



バランスがとれた
設計が重要

超伝導コイル
強磁場・大型
超低温と1億°Cが共存



プラズマ
プラズマを浮かしながら
燃し続ける

燃料は閉じ込める
燃焼で出たヘリウムは排気
の相反目標

ブランケット部
1) 冷却
2) 発電タービン用の高温水
等を発生
3) リチウムから燃料を生産

排熱部 (ダイバータ)
ロケットノズル並みの
熱の処理

水爆のように大爆発する？

水爆のように大爆発する？

核融合には1億度が必要。その方法が水爆と核融合炉では違う。

<p>水爆</p>		<p>水爆は原爆で核融合を起こす爆弾。</p> <p>ウランやプルトニウムの核爆発、すなわち原爆の爆発をまず起こし、爆弾中の水素や、リチウム(爆発時に水素に変化)を一瞬で1億度に。 メガトン級で10kg以上の水素が燃焼するはず</p>
<p>核融合炉 磁場方式</p>	 <p>直径～15m</p>	<p>水素プラズマにビームなどを入射して、しだいに1億度にし、核融合だけを起こす。</p> <p>核融合炉では、爆発的に反応が進むことはない。 核融合出力300万kWなら毎秒0.01g</p>
<p>核融合炉 レーザー方式</p>	 <p>直径～5ミリ</p>	<p>数ミリの燃料球をレーザーで1億度に。 イメージは微小爆発。</p> <p>燃料球の大きさとエネルギーは決まっています大爆発はない。 毎秒10パルスで300万kW出力なら各パルス0.001g</p>

停止せず福島のように？

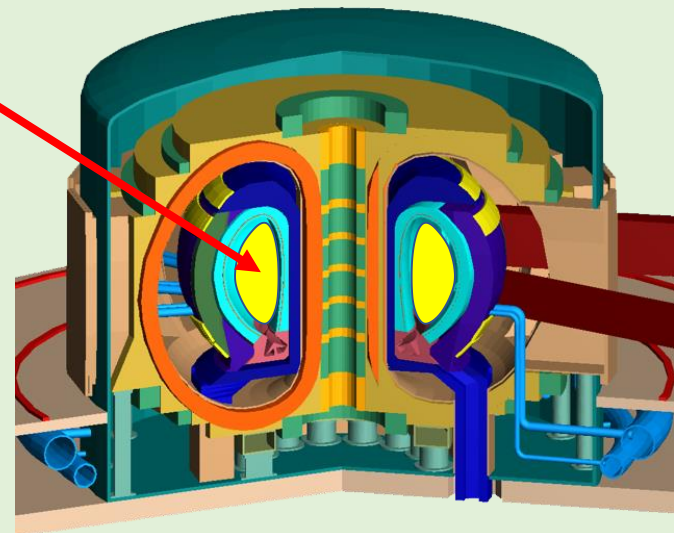
停止せず福島のように？

①福島事故は核分裂は止まった。その後冷却ができずに燃料棒が溶けた。核分裂の暴走ではない。爆発も水素ガスの化学的爆発。

②原発は炉心に約1年分の燃料があるので、核分裂が止められない最悪の場合もありえる。(チェルノブイリ)

①核融合炉の燃料は一億度のプラズマ。燃料が「溶ける」ことはそもそもない。

②核融合炉は燃える分だけの燃料を供給しながら運転している。燃料供給が止まれば停止。



停止せず福島のように？

2枚目

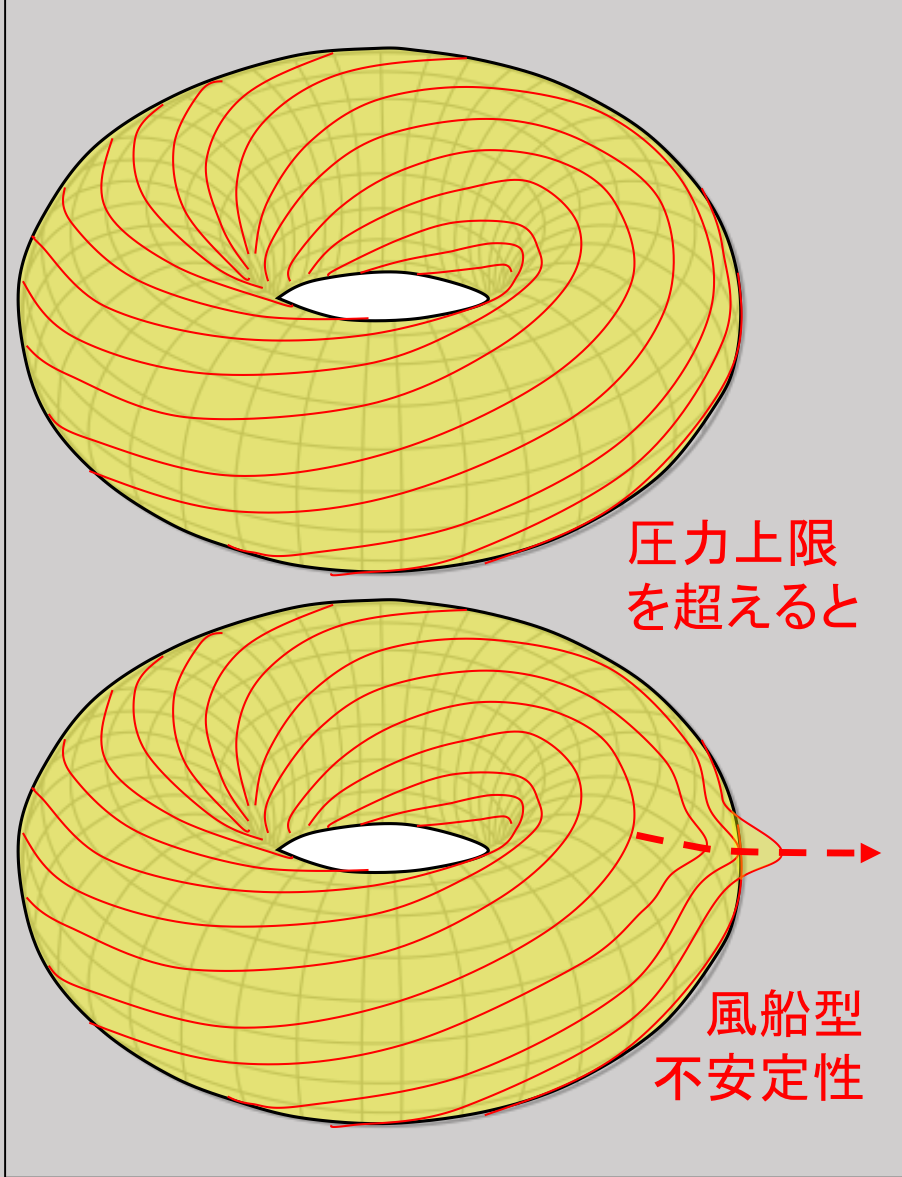
燃料が止まらなかったらどうなるの？

燃料供給も、電源も、磁場も止められず、核融合反応が増加、という仮定をしたら？

磁場の性質から必ず核融合が止まる
プラズマ圧力が磁場が保持できる上限を超えれば必ず冷えて停止。
！！プラズマ温度は1億度だが、圧力は1気圧程度！！

核融合炉は磁場の多重カゴでプラズマを閉じ込める。

高温で圧力が上がりすぎると、磁場カゴが変形（右図）、そこから余分な熱が逃げ、プラズマが冷えて核融合反応が減少、核融合の熱が減って温度が急降下。勝手に核融合は止まる。



廃棄物処分で行き詰まる？

廃棄物処分で行き詰まる？

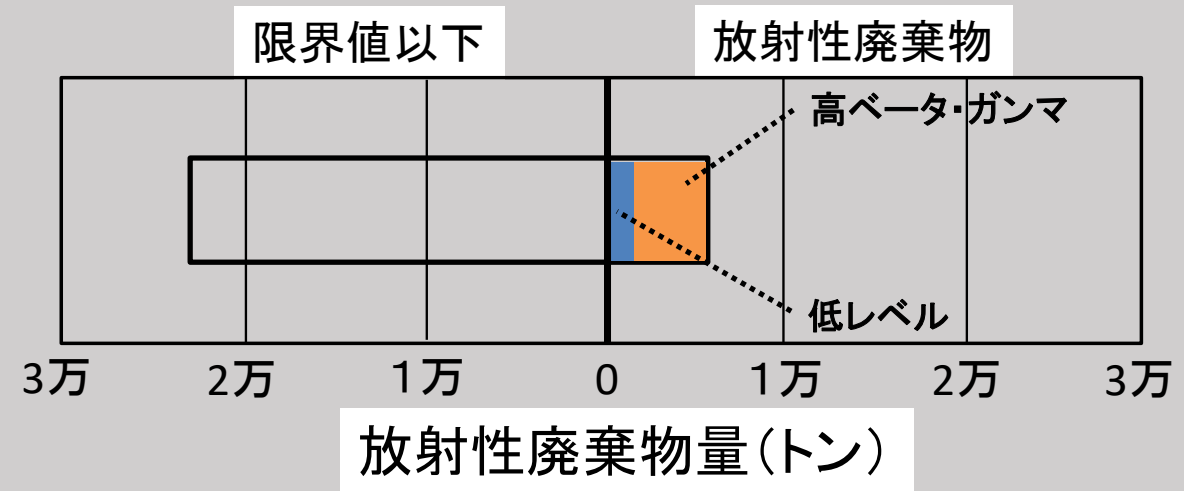
高レベル廃棄物はない。

低レベル廃棄物と高ベータガンマ廃棄物はある。(右図)
既存技術で処分可能。ただし...

核融合炉の高ベータガンマ廃棄物は、原発よりかなり多い。30年で4500トン vs 200トン
大型になる核融合炉の弱点。
保管スペースは、50mプールの体積程度(水は不要)
(1トンあたり1m³くらい取って保管するので、50m×25m×3.6m)

残る大部分は100年保管できれば、放射性とみなされる限界値以下に。捨てずに次の核融合炉に再利用できる。

30年の運用で発生する核融合炉の放射性廃棄物
ただし、100年保管後。



K. Tobita & R. Hiwatari, Journal of Plasma and Fision Research Vol.78 No.11 (2002) pp.1179-1185 をもとに筆者が作成。

高ベータガンマ廃棄物は運転期間に比例して発生。

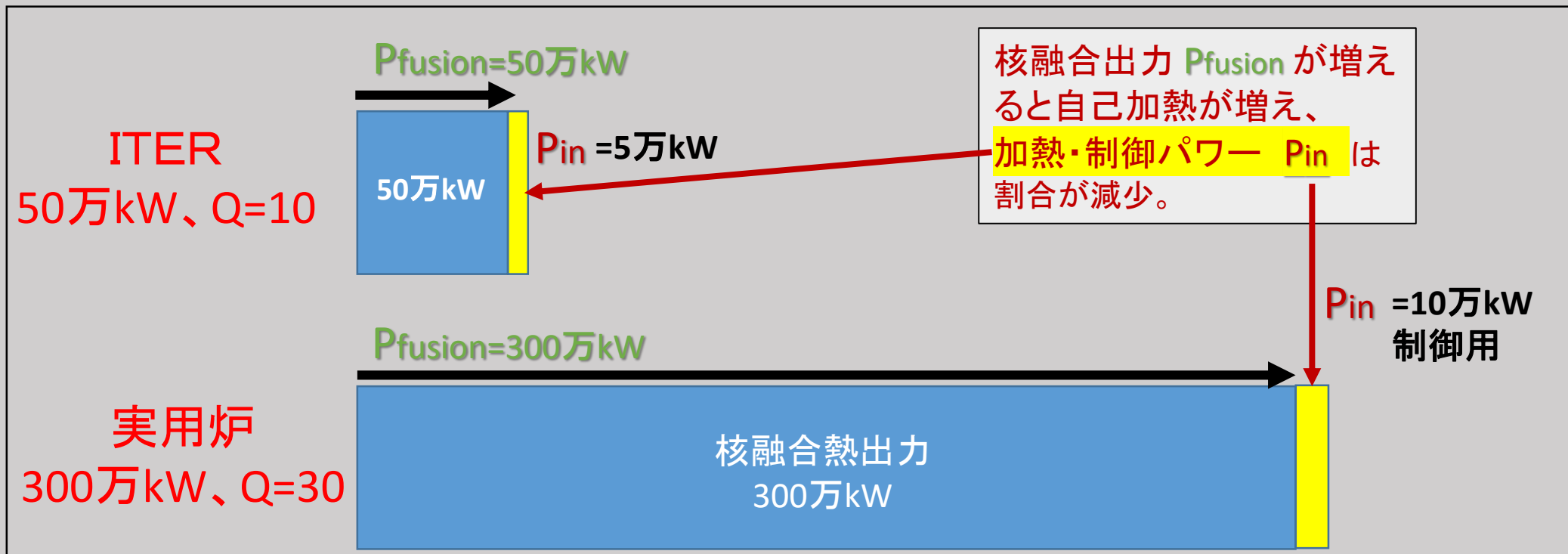
ITERは電気を3倍に増やすだけ？

ITERは電気を3倍に増やすだけ？

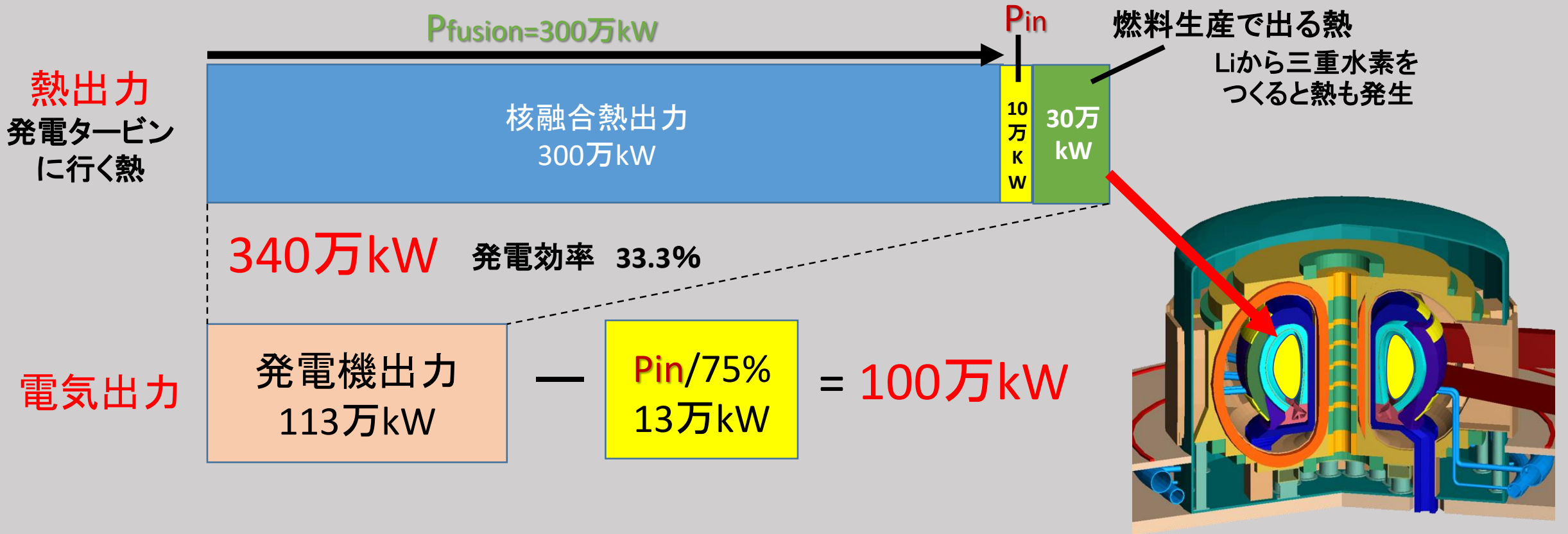
$$Q = P_{\text{fusion}} / P_{\text{in}} = 10$$

ITERの核融合出力 $P_{\text{fusion}}=50$ 万kW、加熱 $P_{\text{in}}=5$ 万kW（熱比 Q は10倍）
ITERは発電試験をしないが、仮に発電すると、 50 万kW × 発電効率33.3% として
発電機出力17万kW…加熱 P_{in} の3倍程度

核融合出力と共に核融合熱でのプラズマ加熱が増えるので、外部加熱割合は減る。
実用炉は $Q \sim 30$ 以上、電気では10倍（次ページに詳細）。



Q=30の実用炉では電気は加熱入力の何倍であるの？



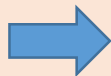
⇒ 加熱入力 P_{in} の10倍の電気が送電可能

燃料製造のエネルギーが大きすぎ？

燃料製造のエネルギーが大きすぎ？

誤情報

海水中の
重水素は
0.015%

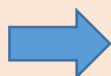


全部まとめて
電気分解して
から重水素を
分離？
そんな無駄な
ことはしない。

海水をそのまま電気分解、という誤解による情報。

正しい製造法

海水中の
重水素は
0.015%



重水素がほぼ
100%まで濃縮。
(GS法)
工業化済で、非
常に高効率。
そのあとで電気
分解。
6600倍高効率。

GS法: 硫化水素の平衡反応を使う。

水素と重水素は重さが二倍も違う
⇒ 化学反応の速度も少し異なる。
⇒ 99.8% 重水 (D₂O) にまで濃縮 (GS法)。

カナダ既存の重水製造設備*で、
重水素を年間800トン製造可能。

⇒ 100万kW級核融合炉100基を100年運転可能な量

*カナダは重水
冷却型の原子炉
を運用している。

重水D₂Oでは4千トン、その製造エネルギーは核融合燃料25g分くらい。800トン/25g=3200万倍。

本当に実用化できるのか？

実用化へのカギは？

3要素それぞれの最高性能を目指すだけでは同時達成できない。同時にできる最適設計点を探す。

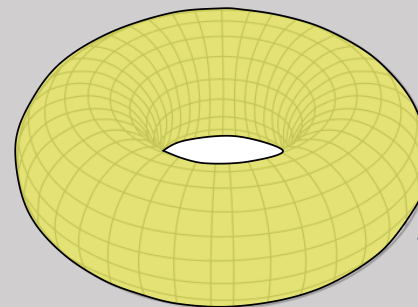
- ①核融合プラズマ維持
 - ②燃料の炉内での増殖
(増殖率 >1 が必須)
 - ③熱処理と
発電用高温熱の取り出し
- 3要素の「同時達成」につきる。

一つ一つなら割と簡単。

ITERは①を達成しつつ、②と③の候補技術をいくつも試して最適化。

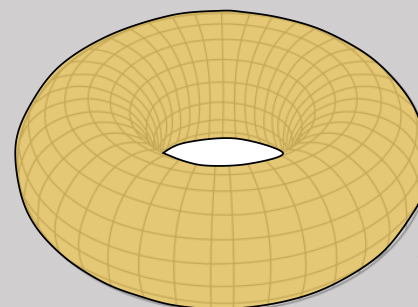
①②③同時達成は、その次の原型炉で実施。

高性能プラズマ
小型化でコスト低



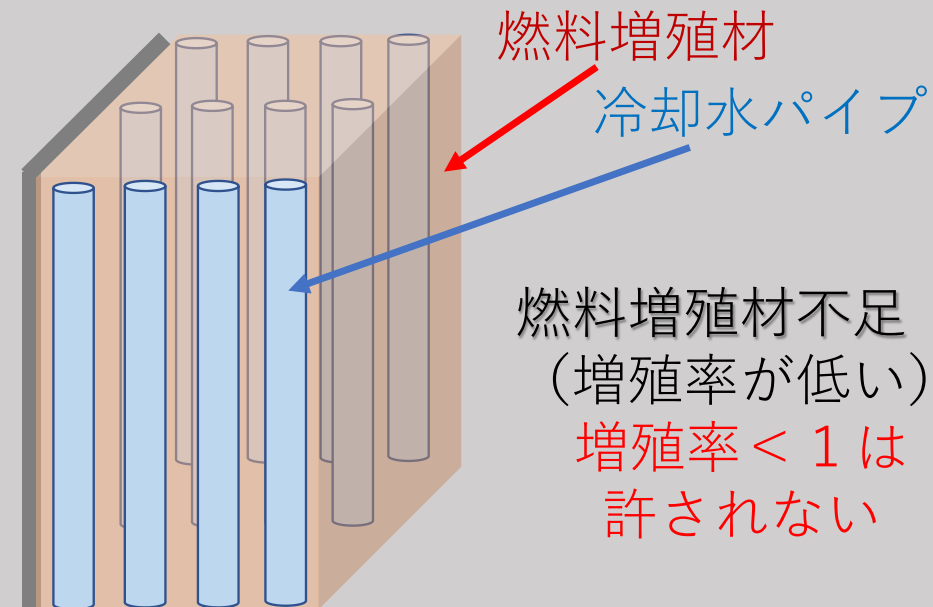
高熱負荷

低性能プラズマ
大型化でコスト高



低熱負荷

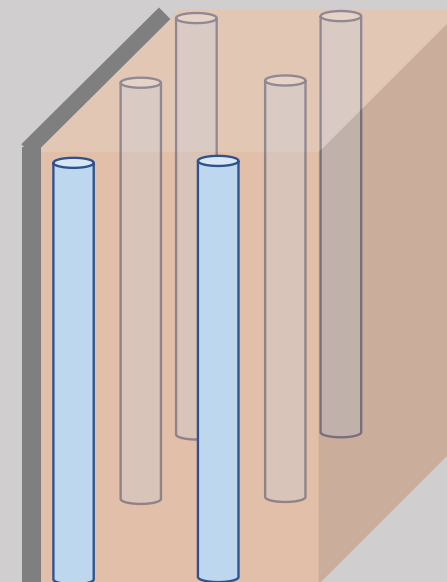
冷却と増殖を兼ねる液体金属
(リチウムやリチウム鉛)にできると、この困難を軽減できる可能性あり。ITERでも試験を予定。



燃料増殖材

冷却水パイプ

燃料増殖材不足
(増殖率が低い)
増殖率 <1 は
許されない



燃料増殖材十分
(増殖率は高い)
しかし
高コストかも

実用化へのカギは？

- ①核融合プラズマ維持
 - ②燃料の炉内での増殖
(増殖率 >1 が必須)
 - ③熱処理と
発電用高温熱の取り出し
- 3要素の「同時達成」につきる。

一つ一つなら割と簡単。

ITERは①を達成しつつ、②と③の候補技術をいくつも試して最適化。

①②③同時達成は、その次の原型炉で実施。

3要素それぞれの最高性能を目指すだけでは同時達成できない。同時にできる最適設計点を探す。



中国・紀元前8世紀の青銅器 鼎(かなえ、てい)
バランスが大切で、足が一本だけ長かったら立たない。

奈良県国立博物館提供の画像

<https://www.narahaku.go.jp/collection/1317-126.html>

未来永劫に「30年後」の技術？

未来永劫に「30年後」の技術？

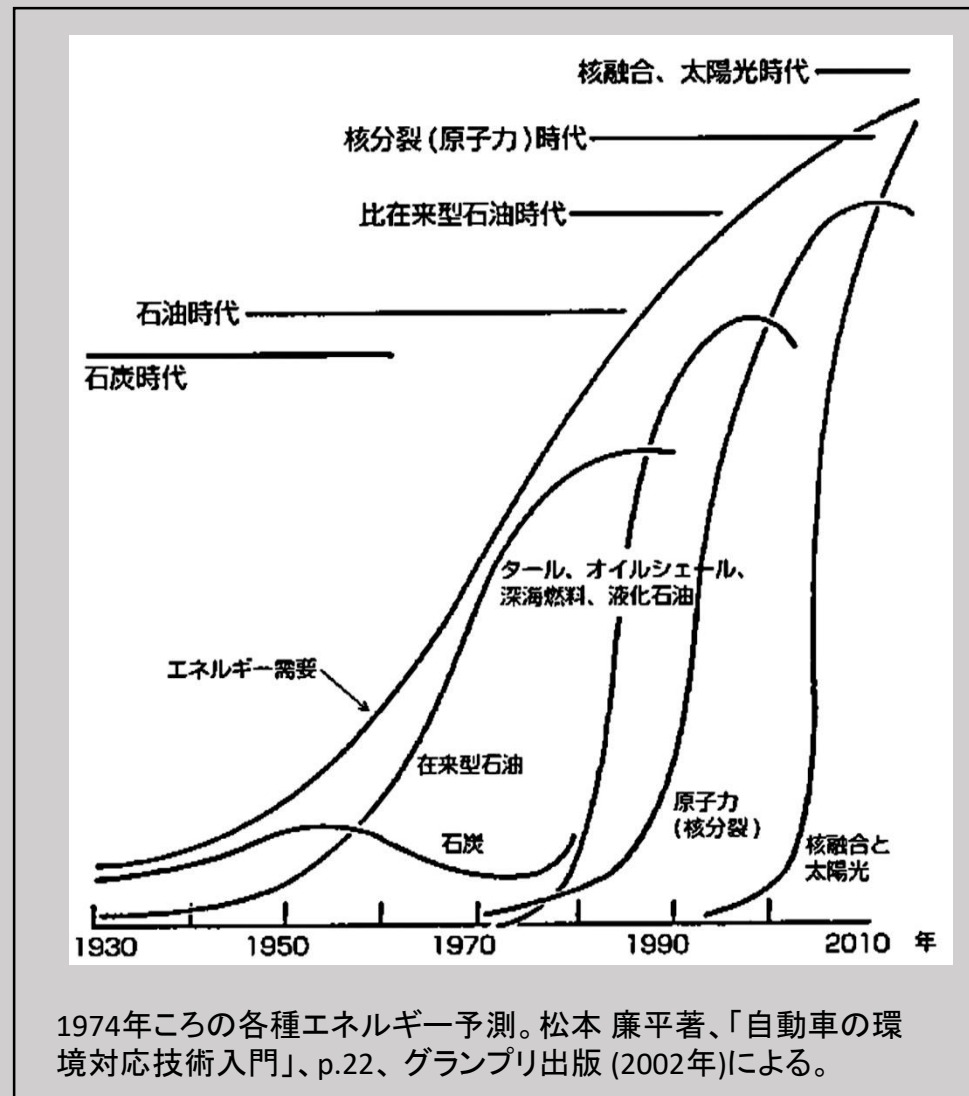
1974年の予測では、21世紀は「核融合、太陽光時代」のはずだった。
核融合以外の予測も全部外れてはいるが...

3要素のうち「①核融合プラズマ維持」しか当時は考えていなかったのだろう。

①は実現済で、ITER(2007年建設開始)でそれを長時間化、原型炉で定常化する。

②燃料増殖(増殖率 >1)と、

③熱処理と高温熱の取り出しは、複数の方式案に絞られていて、ITERで比較し、改良して原型炉に進む。



未来永劫に「30年後」の技術？

2枚目

