

NINS
National Institutes of Natural Sciences
自然科学研究機構



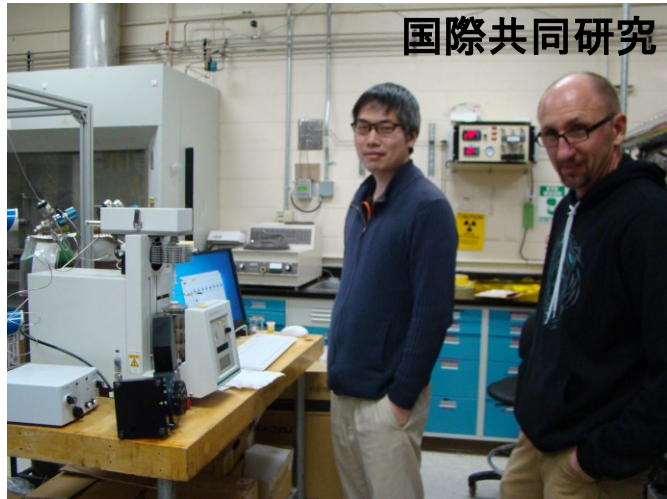
S O K E N D A I

炉システムの概要と開発課題

自然科学研究機構 核融合科学研究所
小林 真 (こばやし まこと)

小林 真（こばやし まこと）

- ◆ 静岡県富士宮市出身
- ◆ 准教授、博士（理学）
- ◆ 所属：自然科学研究機構 核融合科学研究所（岐阜県土岐市）
- ◆ 併任：国立大学法人 総合研究大学院大学（総研大）
- ◆ 専門：材料工学・トリチウム工学・放射線安全工学



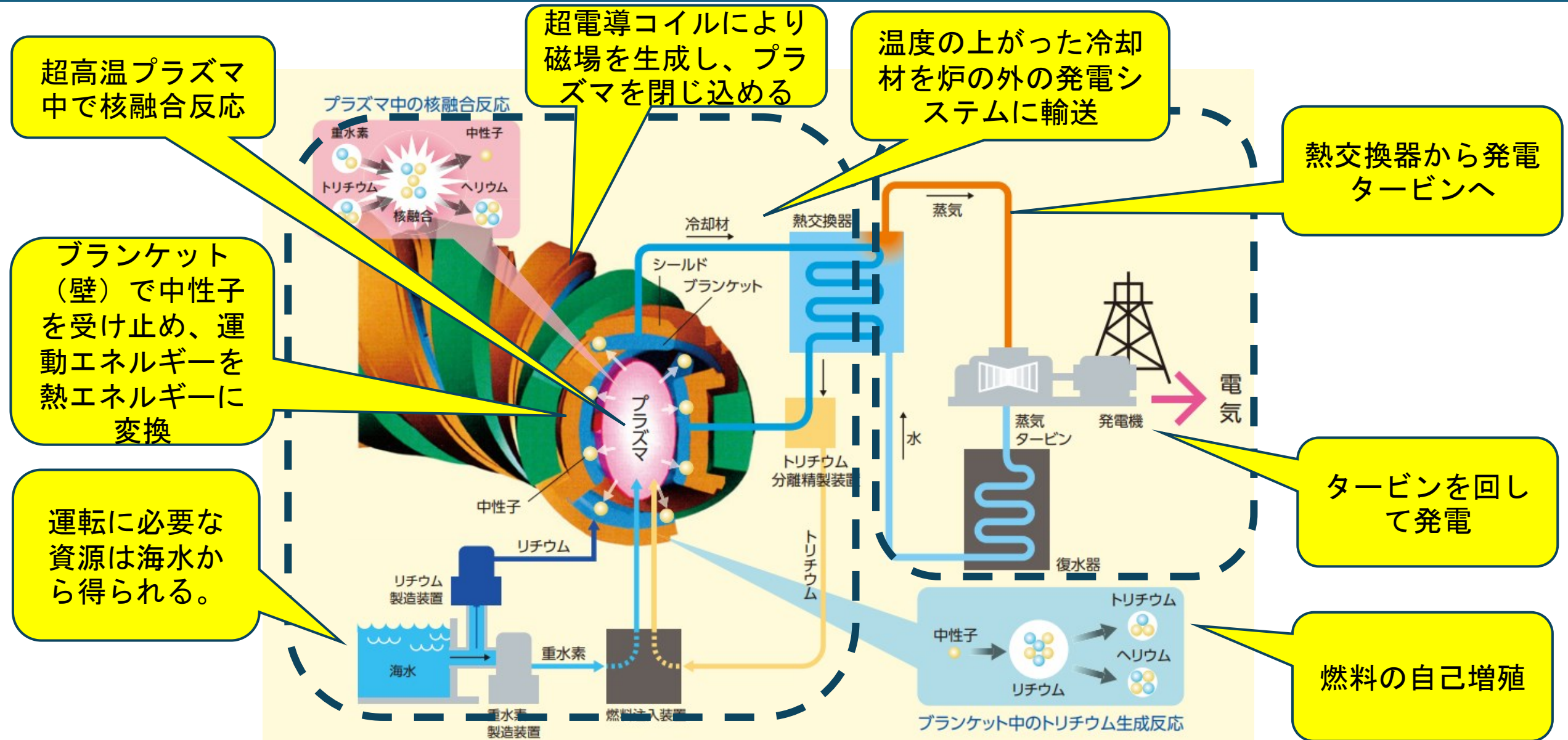
フュージョンエネルギーシステム内で使用される材料の特性評価や燃料粒子の挙動、安全管理・評価に関する基礎的な研究を実施しています！

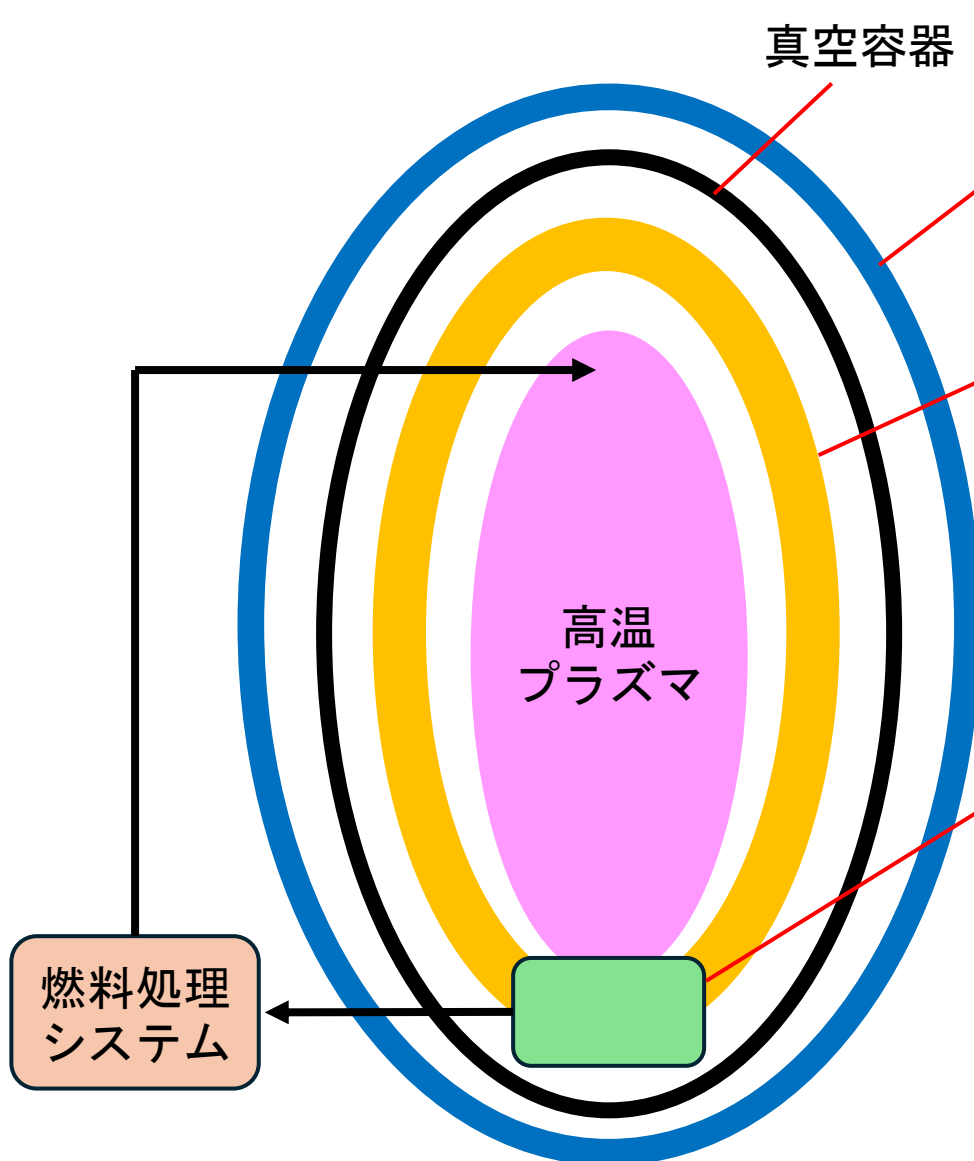
フュージョンエネルギーシステムの：

- 基本構成と各コンポーネントの機能
- 各コンポーネント・システムに関する技術課題
- まとめ

磁場閉じ込め形式を特に紹介
加熱方式以外は類似

フュージョンエネルギーシステムの基本構成





炉構造の概要

超伝導コイル

磁場のかごを生成し、プラズマを閉じ込める。
極低温・大電流（強磁場）

ブランケット

中性子の遮へい（熱エネルギーへの変換）
燃料トリチウム増殖
定常的な熱・生成トリチウムの回収（生成量>消費量）
中性子損傷

ダイバータ

燃料や不純物ガスの排気
非常に大きな熱フラックス

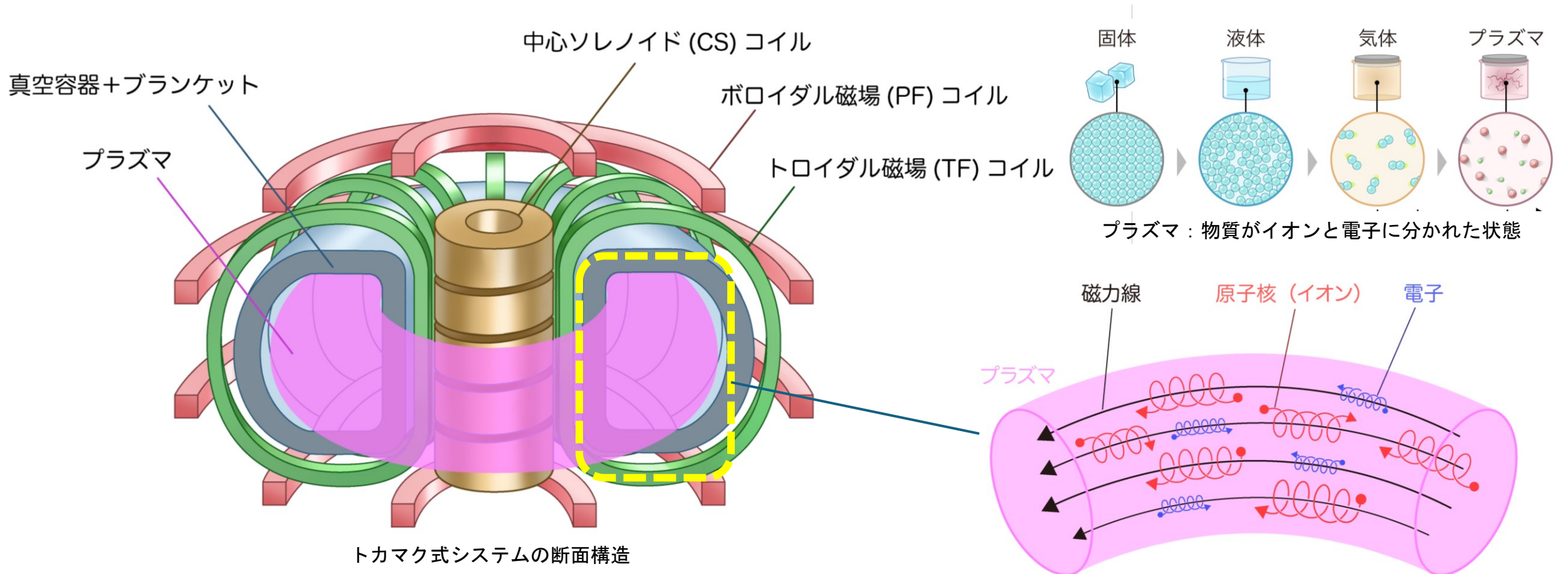
燃料処理システム

排気した燃料の処理（精製・分離・貯蔵）と再投入
大量トリチウム循環

➤ 各システムの役割を詳しくみる

磁場のかごによるプラズマの閉じ込め

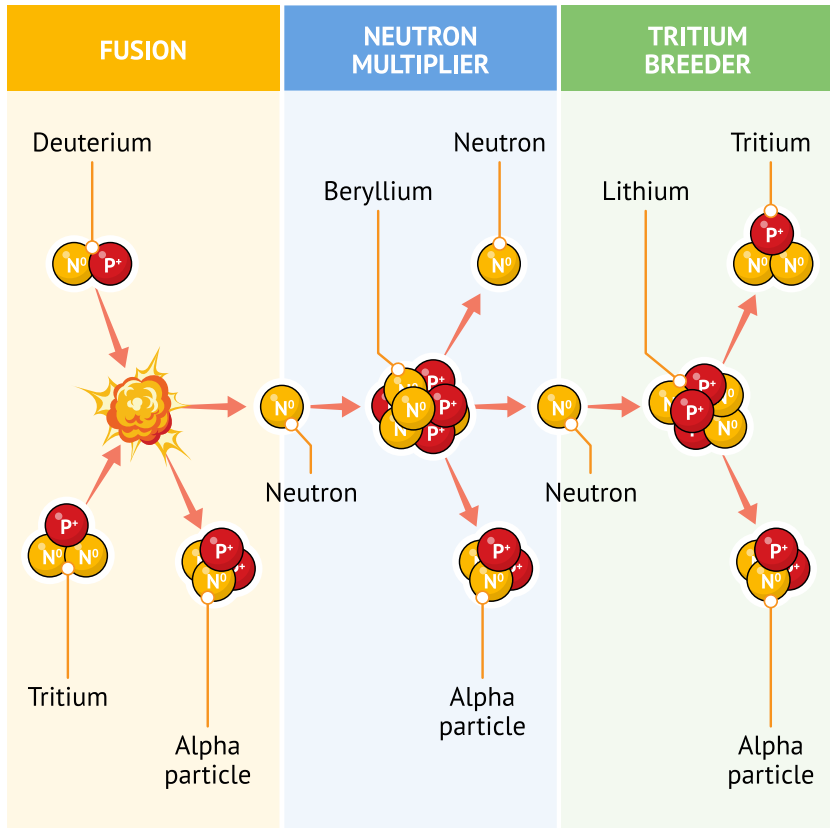
- 核融合反応を発生させるには、燃料粒子同士を加速し、ぶつける必要がある。
- 加熱した粒子が逃げないように工夫が必要。
- プラズマ中のイオン・電子は磁力線に巻き付くように運動：磁場のかごによる閉じ込め



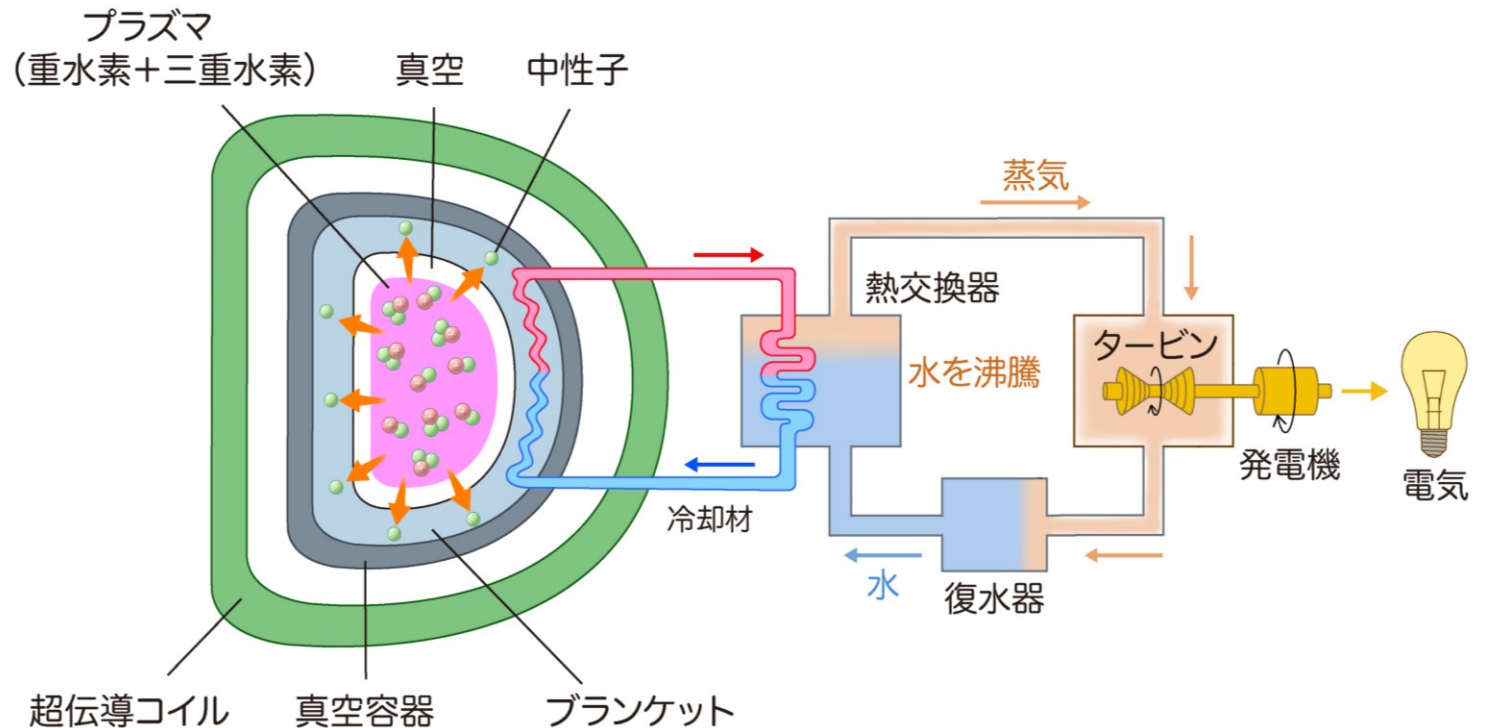
荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動

ブランケット内でのトリチウム増殖

- 核融合反応で発生するエネルギーの約80%は中性子の運動エネルギー
- 中性子は電荷をもたないため、磁場のかごから飛び出しブランケットに衝突する。
- 燃料であるトリチウムは自然界にほぼ存在しないため、炉内で生成する必要がある。

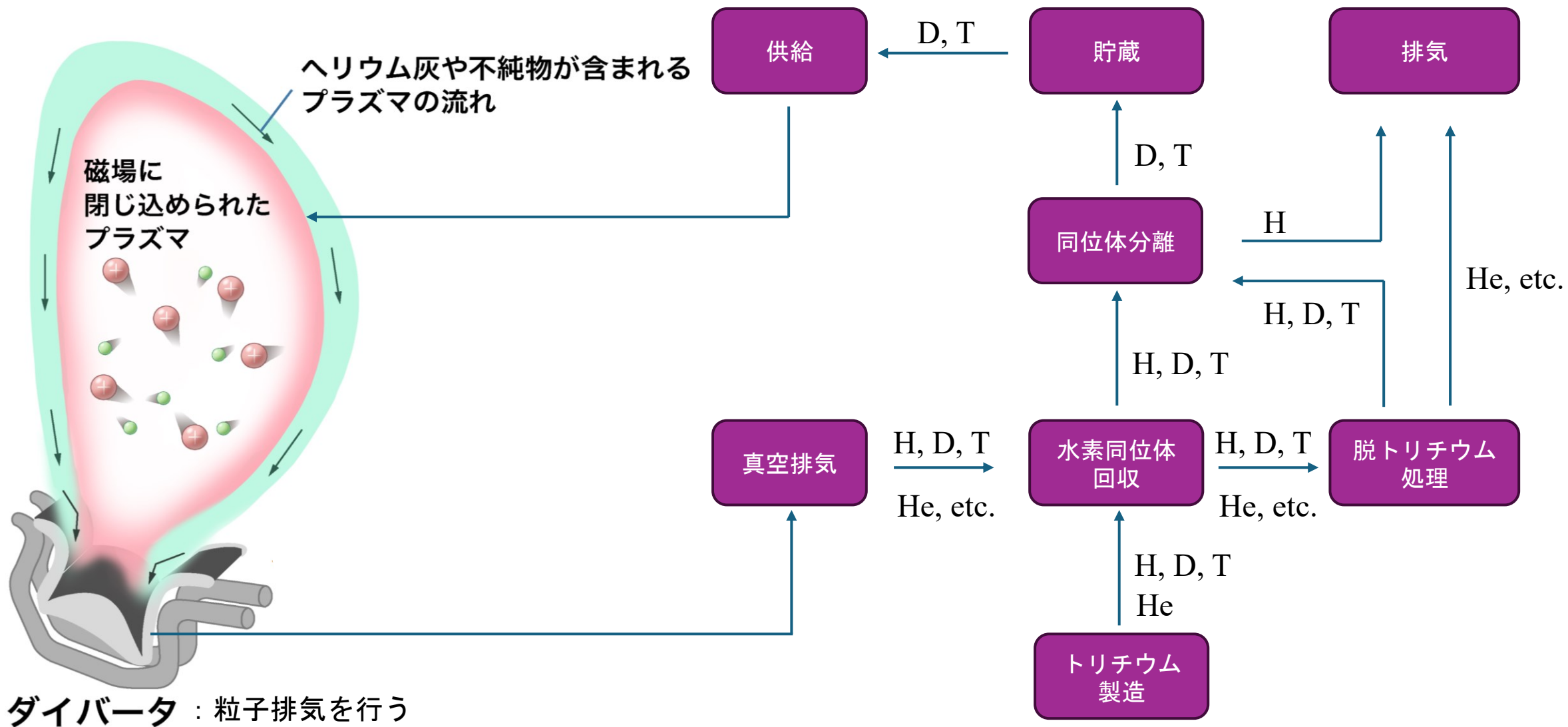


✓ 中性子を減速（遮へい）し、その運動エネルギーを熱エネルギーに変換する。同時に、中性子とトリチウムを反応させてトリチウムを製造する。



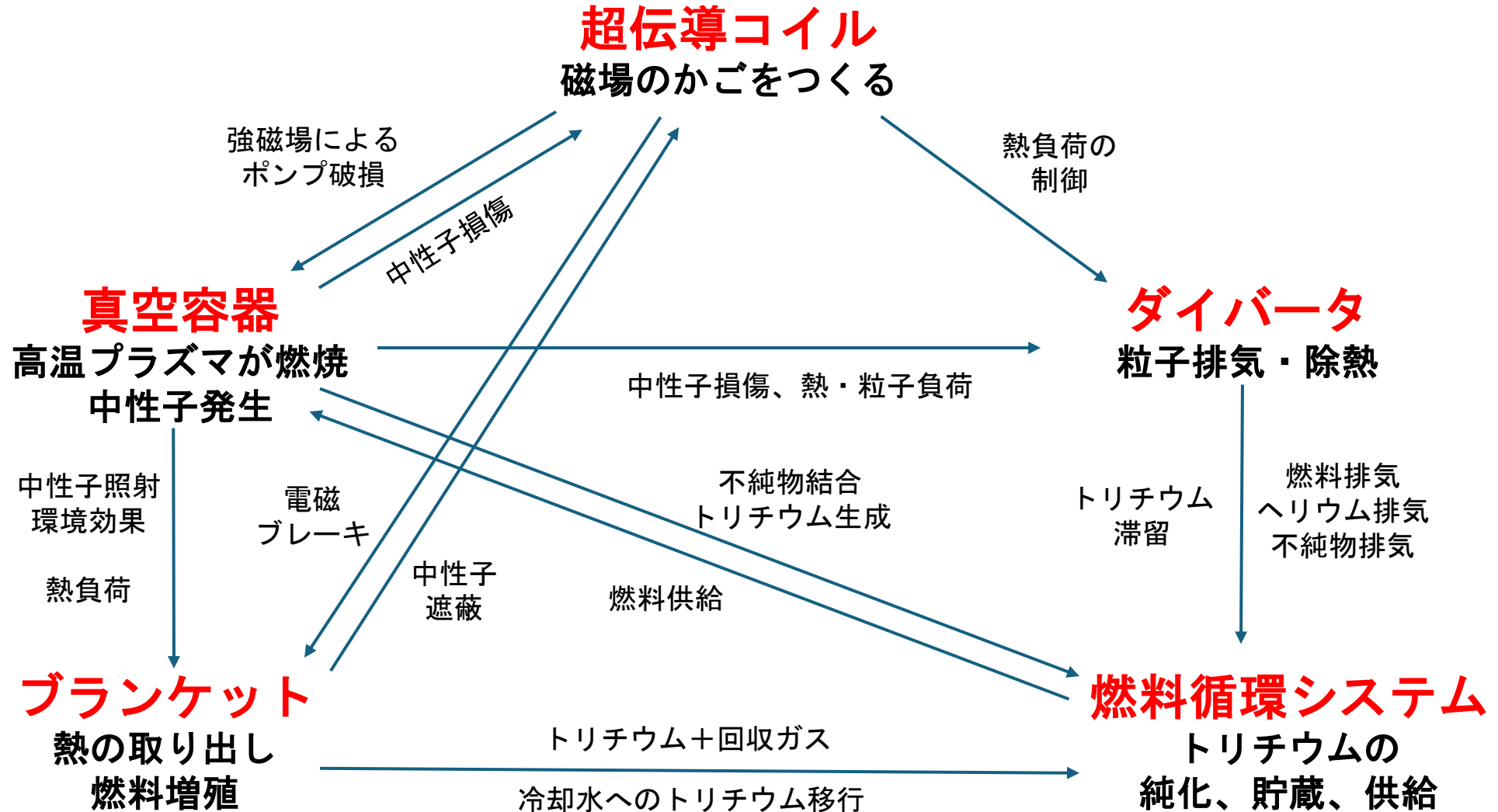
<https://www.energyencyclopedia.com/en/glossary/tritium-breeding>

炉心の排気と燃料循環



炉システムの開発課題

各システムは互いに相関



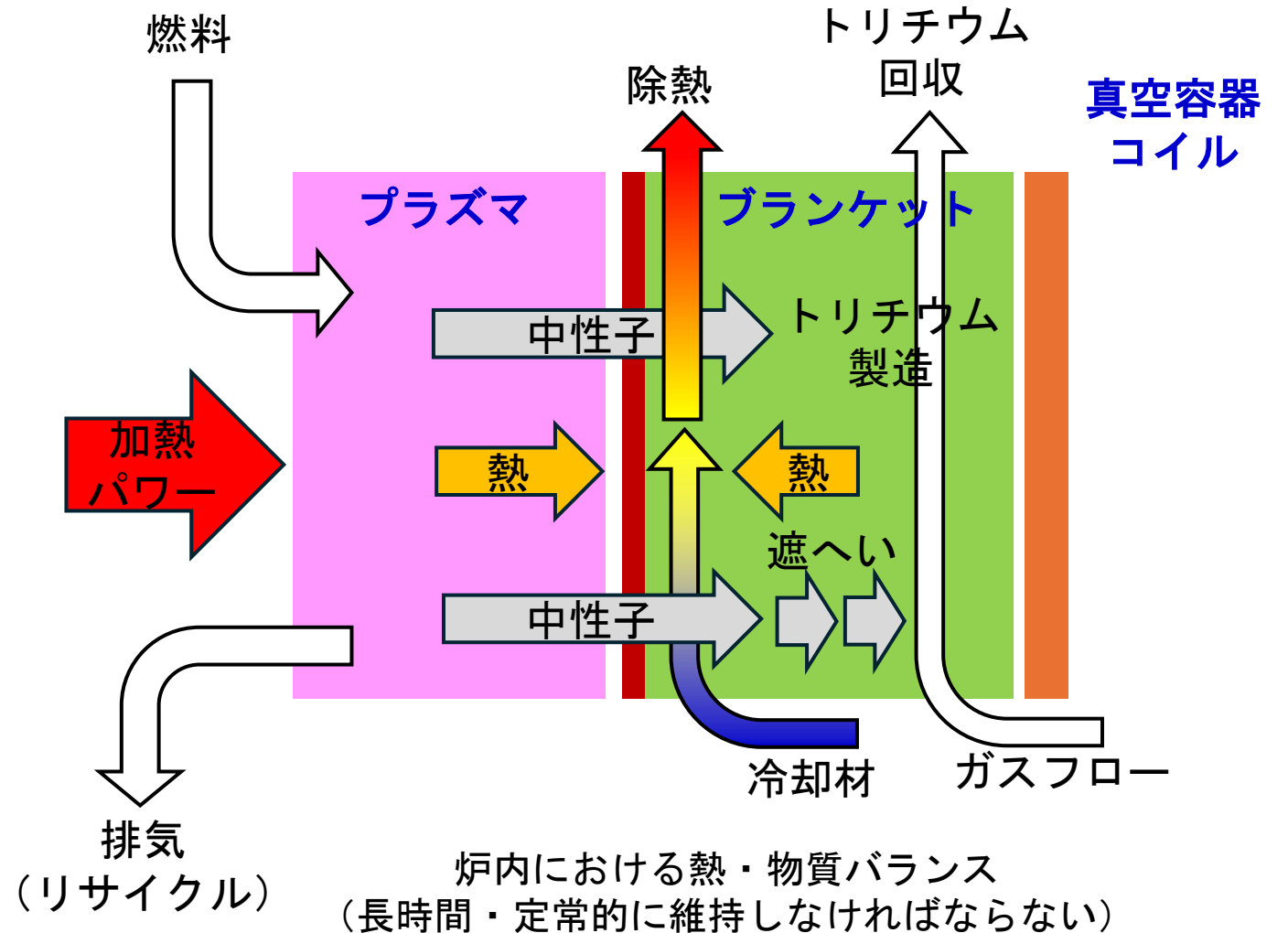
個別の制約 (例)

弱い磁場：プラズマが閉じ込められない
小さいプラズマ：発電が成立しない

システムとしての成立性

プラズマからの熱負荷→壁の高温化
→壁の冷却：冷却材の流通⇄流路の設計、
電磁ブレーキ効果、圧力損失、化学的共存性

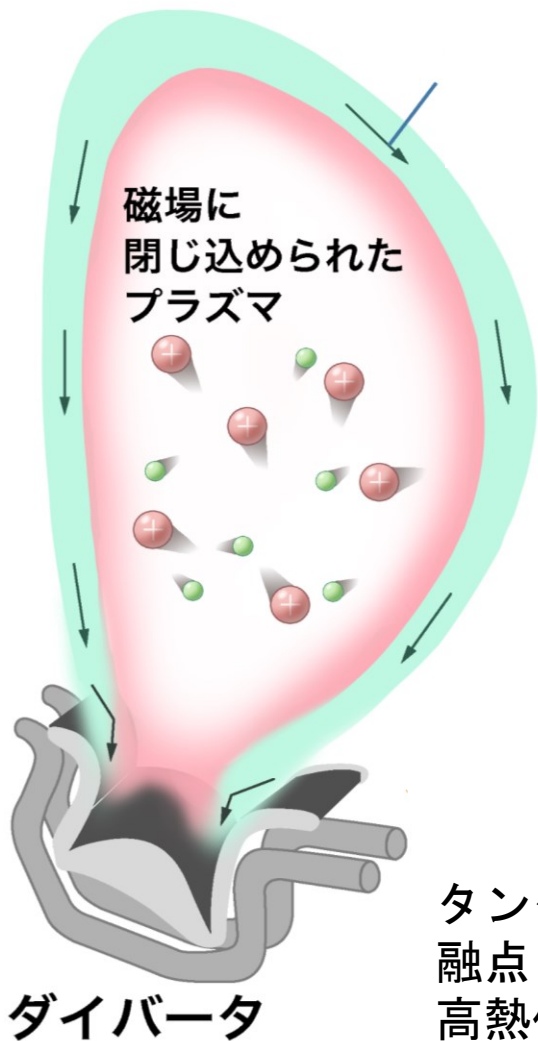
中性子→ブランケットへ衝突
十分なトリチウム製造能力(TBR>1)
中性子の遮蔽 (コイルを守る)
中性子による構造材の劣化 (保守)



熱負荷による溶融

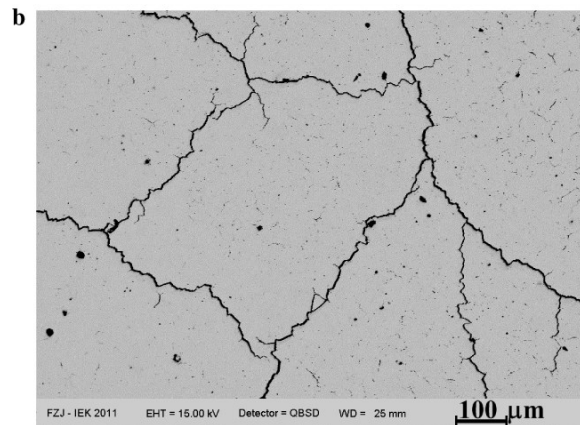


V.P. Budaev, et al., Nucl. Mater. Energy, 12 (2017) 418-422



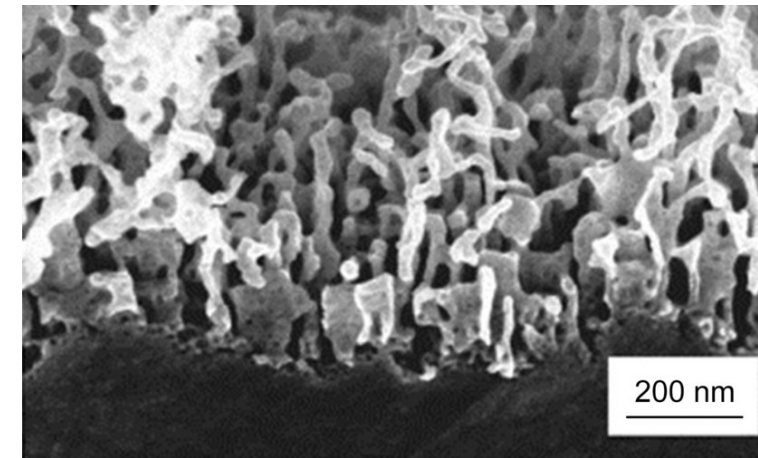
タングステン製
融点：3422°C
高熱伝導性
低スパッタリング

熱負荷による割れ発生



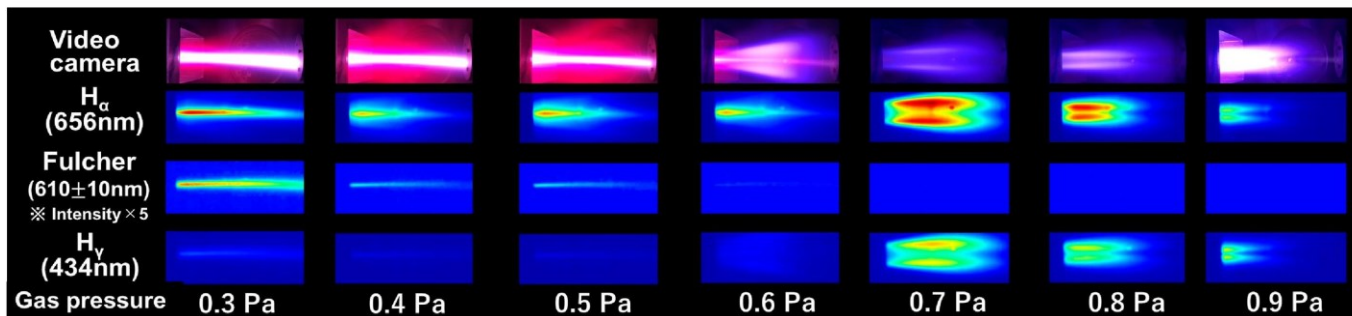
V.A Makhraj, et al., Phys. Scr. T161 (2014) 014040

ヘリウム入射による微細構造発達

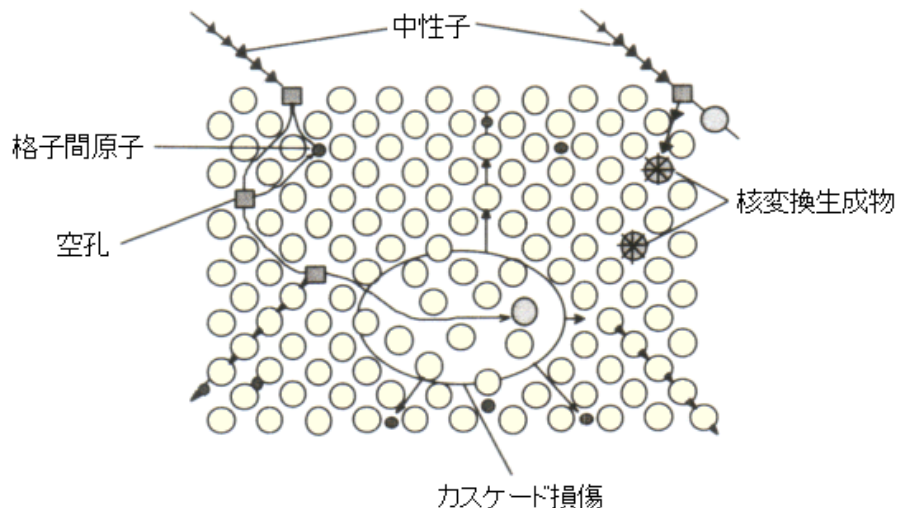


J.A.R. Wright, Tungsten 4 (2022) 184-193

不純物入射によるプラズマの非接触化技術



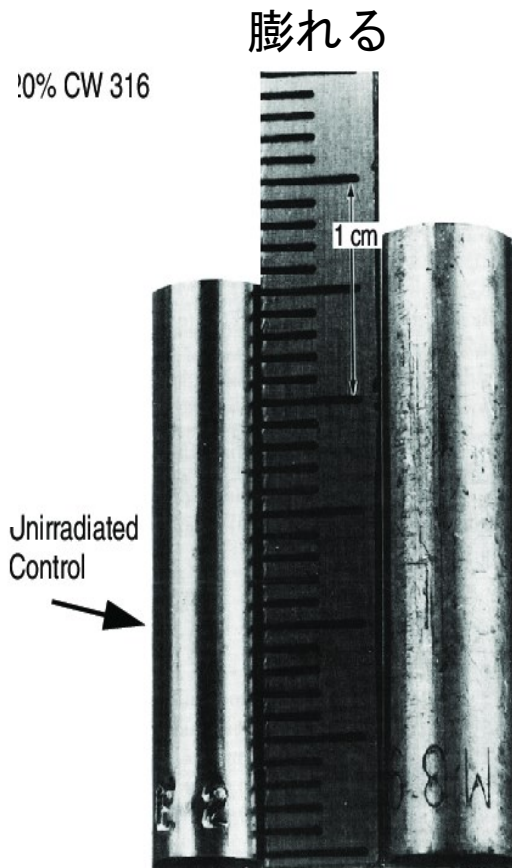
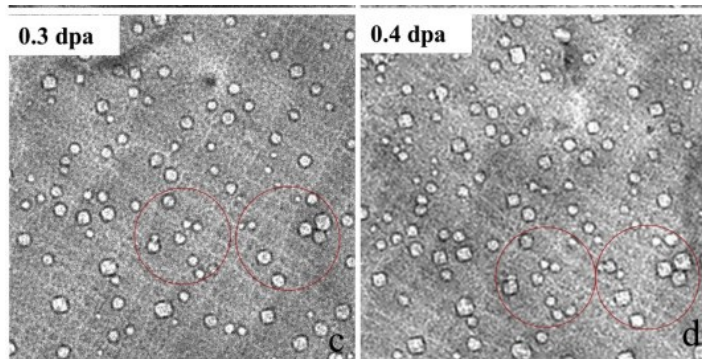
A. Tonegawa, et al., Nucl. Mater. Energy, 41 (2024) 101802



- ◆ 核融合反応で発生する中性子が炉材料を構成する原子に衝突
- ◆ 構造に歪みが生じ、材料の特性が劣化する。

図1 中性子照射を受けた材料に起こる損傷の素過程(模式図)

穴だらけ
W-5Ta 1000°C



特性の劣化 (例: 伸びない)

Irradiation Temp.	Irradiation dose							
	0.3 dpa		1.0 dpa		3.0 dpa		18.0 dpa	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
500 °C								
800 °C								

I. Ipatova et al. / Journal of Nuclear Materials 526 (2019) 151730

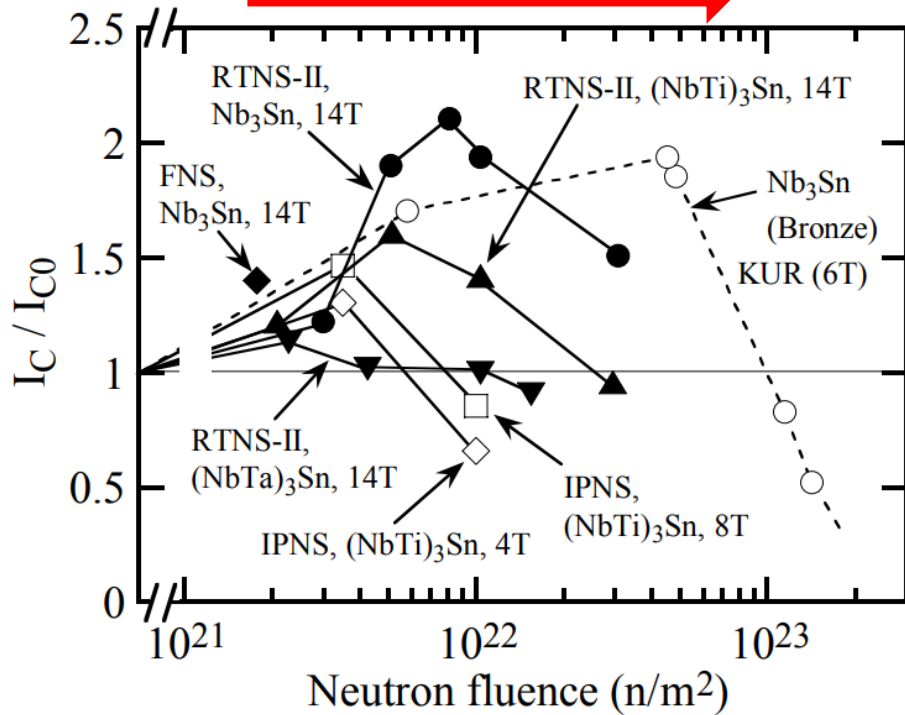
T. Allen, et al., JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society 60(1):15-23

J.H. Yu, et al., Nucl. Mater. Energy, 30 (2022) 101145

極限環境に耐える材料・若返る材料

炉内に存在する極限環境（高い応力、熱負荷、中性子照射、など）に耐える新材料の開発が精力的に進められている。

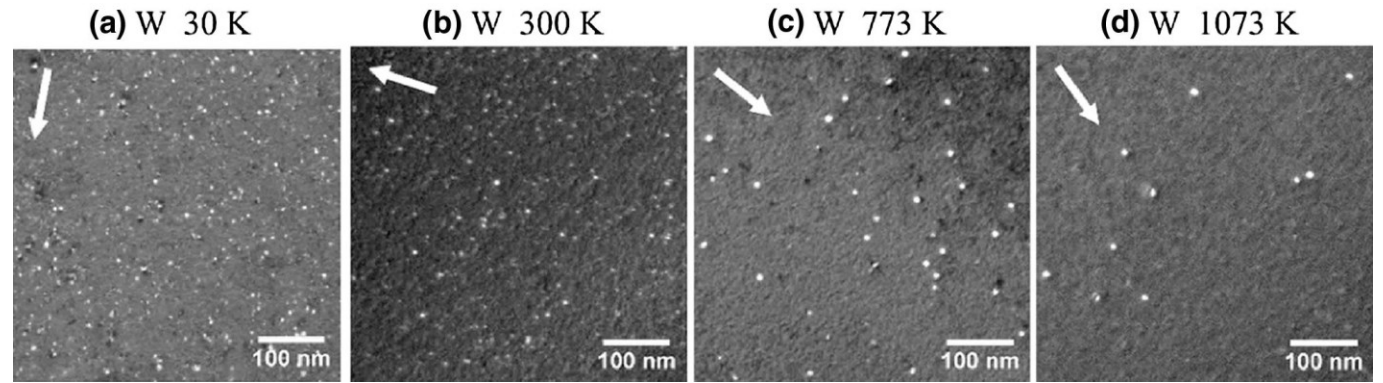
もっと長時間運転したい！



A. Nishimura, AIP Conf. Proc. 1219, 255–262 (2010)

材料の損傷レベルが炉の寿命を決める？

高温になると中性子衝突で生成した照射損傷が拡散できる。互いに結合して消滅する。



S. Das, SN Appl. Sci., 1 (2019) 1614

- 液体は損傷しない
- 流動による高い除熱能力



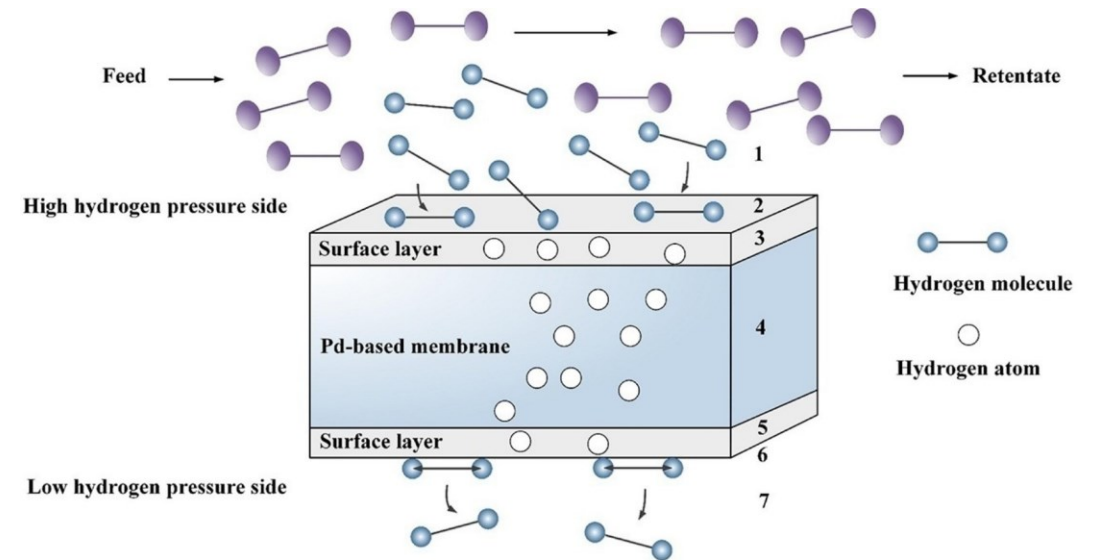
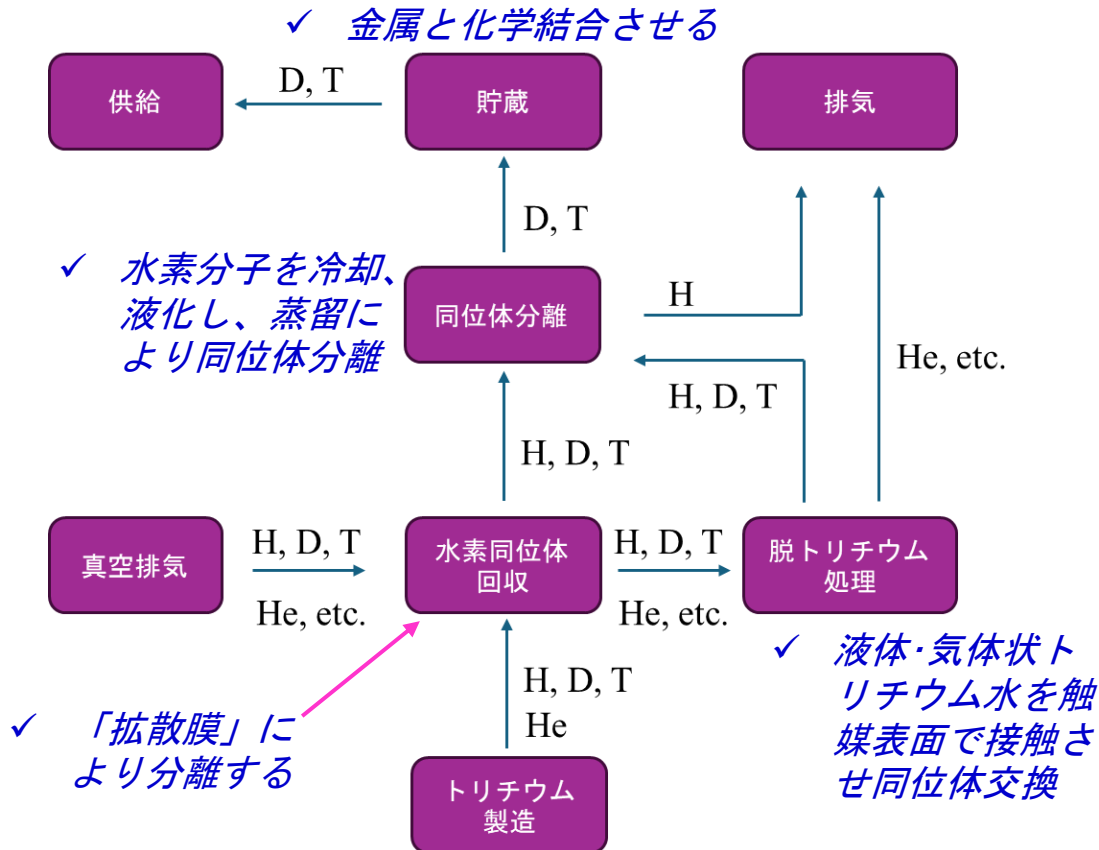
中性子照射で生じた損傷は加熱により消滅し特性も元に戻る。

- 損傷が生じても炉運転環境で自然に構造を回復し、特性を維持する材料
- 特定の構造を持たない、液体材料の利用

放射性物質を閉じ込めるシステム

- ◆ フュージョンエネルギーシステムではトリチウムと重水素を燃料として使用。人類が経験したことのないほど大量トリチウムが使用される。
- ◆ トリチウムは移動度の高いガス、水といった化学形態であることが多く、透過現象と相乗して炉システムから環境へ移行しやすい。

- ◆ トリチウム処理系では、水素と金属の相互作用、化学平衡論、分離工学などの技術によりトリチウムを循環させる。これらの技術はITERにて統合され、実証される予定。
- ◆ さらに長時間、信頼性が高く、トリチウム漏洩の小さい運用技術開発は引き続き必要。



M.R. Rahimpour, et al., Chem. Eng. Process, 121 (2017) 24-49.

パラジウム合金は水素同位体のみを透過させる性質があり、これを利用し不純物と水素同位体を分離する。

エネルギー閉じ込め時間のスケーリング（経験的な予測式）

$$\tau_{IPB98(y,2)} = 0.0562 \times I_p^{0.93} B_t^{0.15} n_e^{0.41} P_{l,th}^{-0.69} R_{geo}^{1.97} K_a^{0.78} \epsilon^{0.58} M_{eff}^{0.19}$$

炉のエネルギー閉じ込め時間

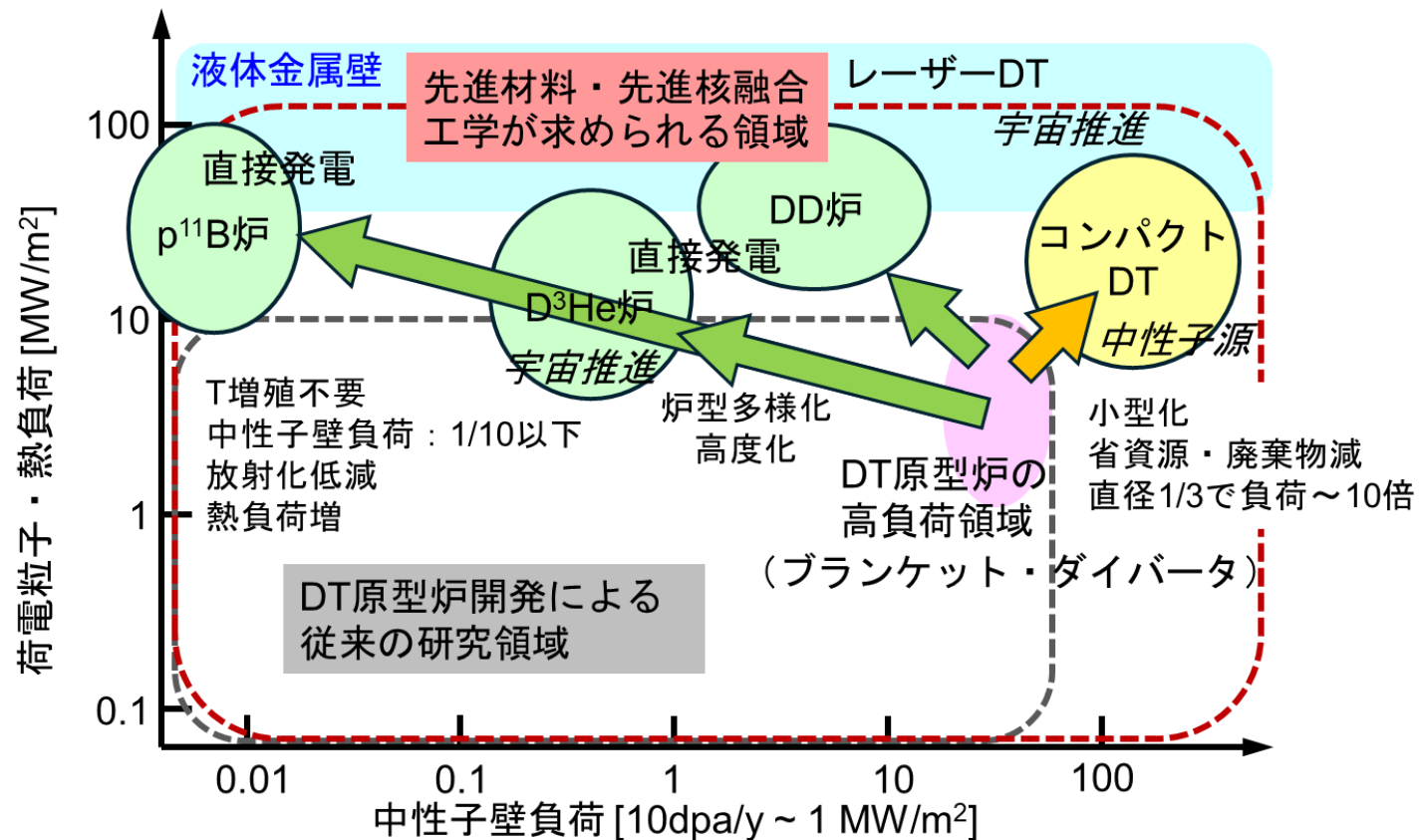
磁場の強さ

装置サイズ

低コスト、経済的、または放射能リスクの小さいなフュージョンエネルギーシステムは可能か？

装置半径を半分にすれば、コストは1桁程度下げられると期待
小型化した分の性能低下は強磁場化で相殺できる。

炉壁への熱流入、中性子による損傷量は4倍程度になってしまう。
先進炉では更なる高温化が必要



中性子壁負荷、粒子・熱負荷に関する材料使用環境マッピング

廃棄物低減

フュージョンエネルギーシステムの一部の機器は、高い中性子損傷量により、定期的な交換が必要。

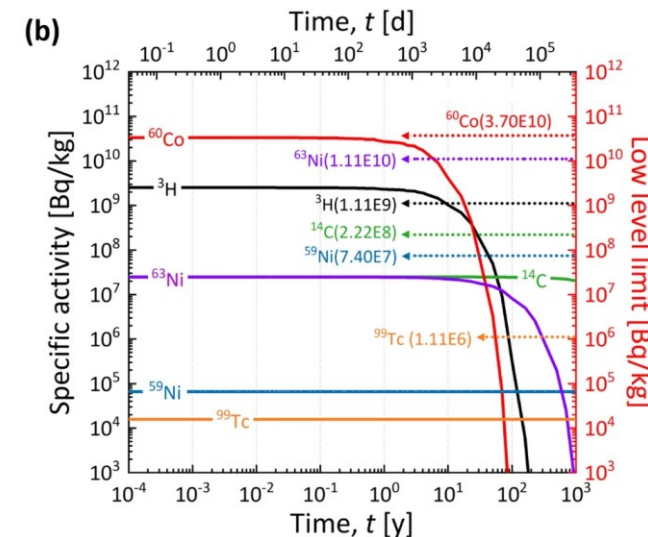
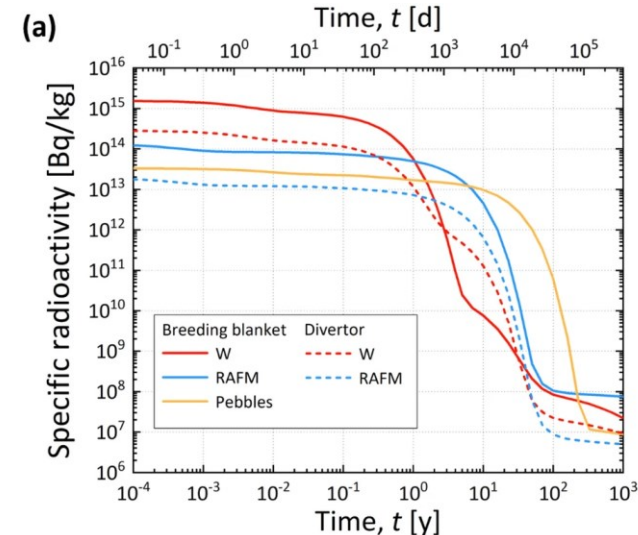
コンポーネントを低放射化材料で構成することで、使用後のリサイクルを可能とし、廃棄物の少ない魅力的なフュージョンエネルギーシステムを構築することができると期待。

核融合炉で125 dpaまで使用後100年の冷却で人間が防護無しで作業し材料を再利用する場合の使用可能元素

H	■青:無制限に使用可能 ■黄:0.1%以上添加可能、合金元素となりうる □白:使用不可、不純物として除去必要																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	高融点金属:高温で高強度										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	*2															
		*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		*2	Ac	Th	Pa	U											

核融合科学研究所 超高流束協奏材料ユニット ユニット設立報告会資料
謝辞:長坂教授 (NIFS)

残留放射能の予測



フュージョンエネルギーシステムは、極限環境に耐え、高いトリチウム閉じ込め機能、高信頼性で長期間運用できるコンポーネント群から構成される。

フュージョンエネルギーシステムのエネルギー取り出しにおける技術的成立性、経済的合理性、社会的受容性の確立に向けた技術開発は日進月歩。

ITERから原型炉への統合戦略

まだまだ多くの技術課題がある。多くの研究者・技術者の参入が不可欠。

興味のある方は、学術課題集：核融合プラズマのサイエンスとその拡がり
https://www.nifs.ac.jp/research/Fusion2030/FPWG/fpwg_SciChallenges.html
を是非、ご覧ください！