

開催日:2026年1月30日(金)

場所:慶應義塾大学 日吉キャンパス協生館



Fusion Science School 2025「フュージョン発電所の作り方～未来をデザインする三日間～」

「核融合炉を形にする一工学の挑戦」

笠田 竜太

博士(エネルギー科学)

東北大学金属材料研究所・教授

(慶應義塾大学KMD研究所フュージョンインダストリー研究センター)



TOHOKU
UNIVERSITY

1. 自己紹介
2. フュージョンエネルギー概論
3. フュージョンエネルギーを取り巻く状況
4. フュージョンエネルギー実現のクリティカルパス
5. 核融合炉設計概論

自己紹介：笠田竜太（53）



- 1991.3 千葉県立木更津高等学校卒業
- 1996.3 東北大学工学部原子核工学科卒業（山口貞衛研究室）
- 1998.3 同大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士前期課程修了（松井秀樹研究室）
- 2001.3 京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了（木村晃彦研究室）
- 2001.4 京都大学エネルギー理工学研究所・助手→助教（木村晃彦研究室）
- 2011.12 京都大学エネルギー理工学研究所・准教授（小西哲之研究室）
- 2017.10～ 東北大学金属材料研究所・教授
- 2018.3 北海道大学科学技術コミュニケーション教育研究部門（CoSTEP）選科B修了
- 2024.4～ 東北大学総長特別補佐（広報）
 - 政府委員
 - 文部科学省核融合科学技術委員会原型炉開発総合戦略タスクフォース副主査、主査（～2023）
 - 原子力規制庁 外部専門家

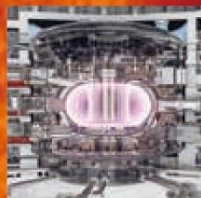
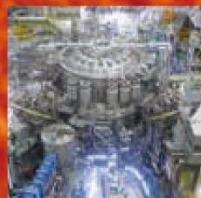
専門：原子力・核融合材料工学、エネルギーシステム工学、科学技術コミュニケーション論

図解でよくわかる

核融合エネルギーの きほん

「核融合エネルギーのきほん」
出版委員会 編

世界が変わる夢のエネルギーのしくみから、
環境・ビジネス・教育との関わりや将来像まで



誠文堂新光社

図解でよくわかる

核融合エネルギーのきほん

世界が変わる夢のエネルギーのしくみから、環
境・ビジネス・教育との関わりや将来像まで

https://www.amazon.co.jp/dp/441662056X/ref=cm_sw_r_tw_dp_x_w.u8FbSS7ZMNA

著者「核融合エネルギーのきほん」出版委員会

小川雄一 (東京大学名誉教授、文部科学省 核融合科学技術委員会主査)

岡野邦彦 (慶應義塾大学機械工学科(教授)を経て、現職は株式会社ODAC
取締役。文部科学省 核融合科学技術委員会委員、天文年鑑執筆者)

笠田竜太 (東北大学金属材料研究所 教授。文部科学省 核融合科学技術委
員会核融合開発戦略タスクフォース委員)

2021年1月12日発売！
(AMAZON等で購入可能)

あわせてどうぞ

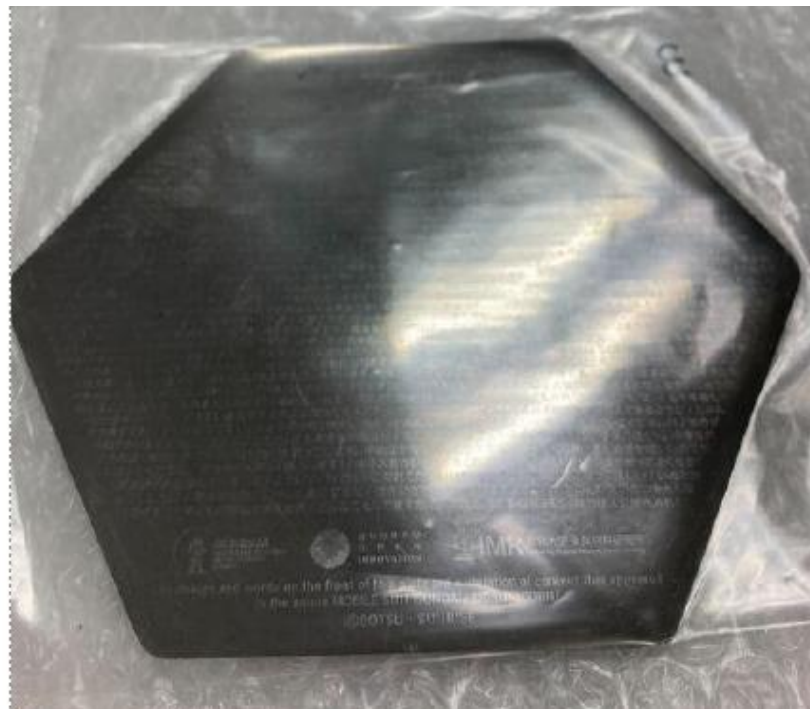


2022/3/28発売(★ 4.5)

笠田研が作った材料のG0I宇宙世紀憲章、月へ！



1枚目



万博ガンダムパビリオンに協力

G0I宇宙世紀憲章に使われた合金は、笠田研がHelical Fusion社とともに核融合炉用に開発を進めるAl添加高MnオーステナイトODS鋼のプロトタイプ

Ispace社の民間月面探査プログラムHAKUTO-Rミッション2のローバーに搭載され月面に送られるも・・・

金研の名前が月へ



笠田 竜太
教授

2017～ 東北大金研教授

核融合材料、原子力材料、超微小試験技術、
科学技術コミュニケーション論



准教授

近藤 創介

2018～



原子力材料、SiC材料、照射損傷



学術研究員

長谷川 晃
名誉教授



JSPS PD

Geng Diancheng

USTT, ODS超合金

川村 麻奈

事務補佐員



学生

16名

2026年1月
博士:9名(留学生4名、社会人2名)
修士:5名
学部:2+2名
※博士進学率>50%
(設立以来博士8名輩出)



荻野 靖之

助教
2022～



核融合、中性子計測・
計算解析、放射線



余 浩

助教
2018～

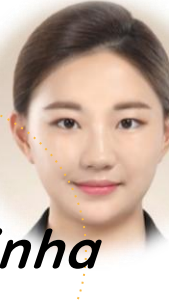


ODS超合金、高温酸化



Park Minha

助教
2024～



鉄鋼材料、W材料

協力教員



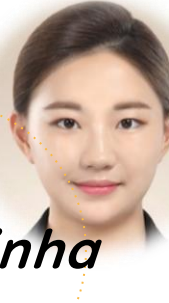
藪内 聖皓

准教授(アルファ
放射体実験室)
2025～



Peng SONG

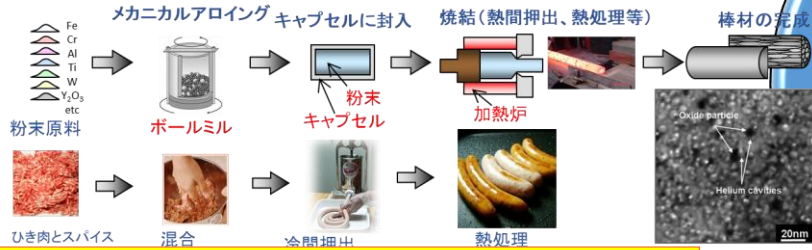
助教(兼笠田研)
2025～



核融合炉の実現、安全安心社会に貢献する当研究室の材料研究



ナノ粒子分散強化超合金 (ODS合金)



照射・極限環境に強い材料を創る

SiC、高融点ホウ化物等セラミックス材料

MA、焼結技術

金属間化合物

被覆技術

DFT計算

照射効果・環境効果のメカニズムを解明する

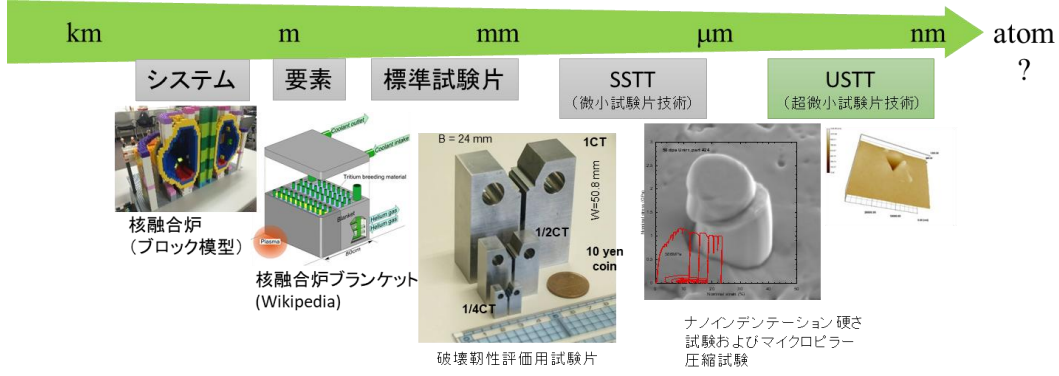
核融合炉の実用化、既存の基幹エネルギープラントの信頼性向上

照射効果・環境効果をはかる

高分解能X線分光法：過酷事故模擬材料の局所化学状態分析等

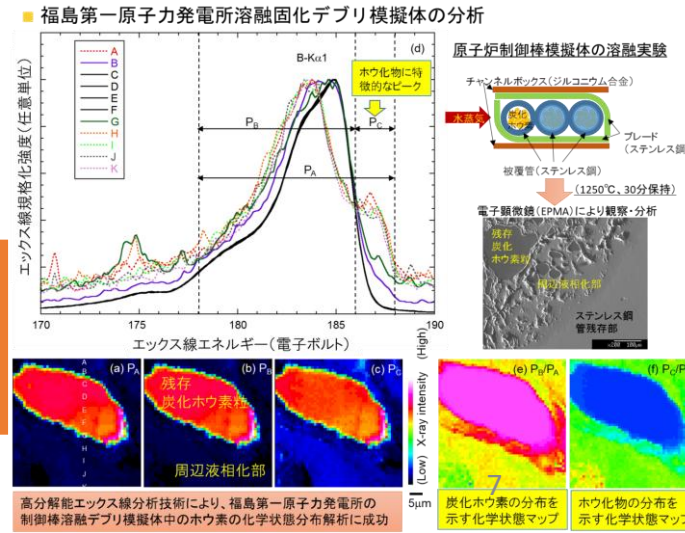
エネルギー問題、核融合炉開発、材料工学に関する社会連携活動

LEGO



超微小試験技術：ナノ・マイクロサイズ試験片による材料の機械的性質の評価

イオンビーム照射技術：照射研究



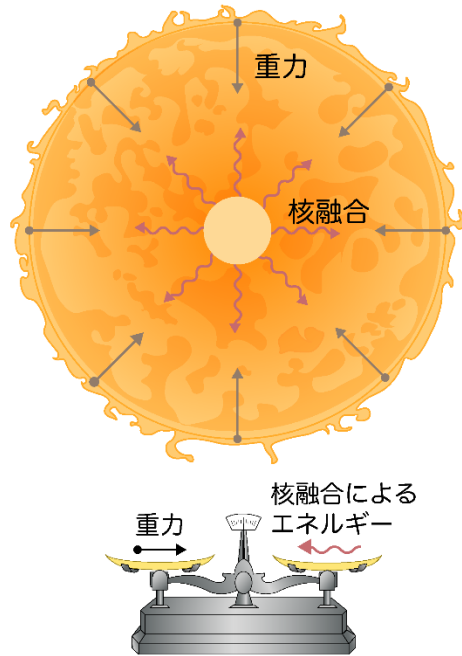
フュージョンエネルギー概論

核融合炉というアイデア

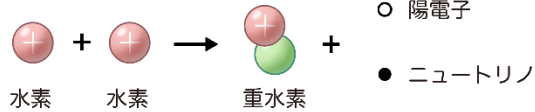


もちろん、太陽の輝きのエネルギー源でもある

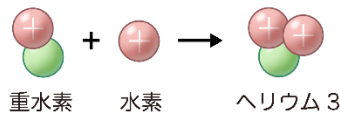
太陽の核融合



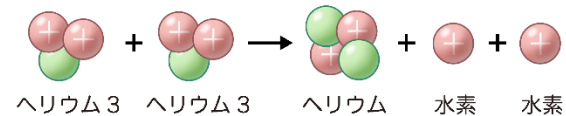
[第1ステップ]



[第2ステップ]



[第3ステップ]



Hans Bethe
Nobel Prize in Physics (1967)

Photo from Wikipedia

1938-39年 アメリカ

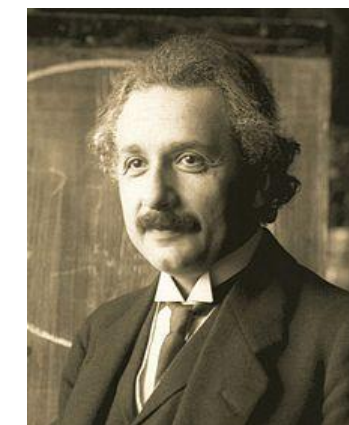
「フュージョンエネルギーは、宇宙、そして生命の母である」

質量とエネルギーの等価性

$$E = mc^2$$

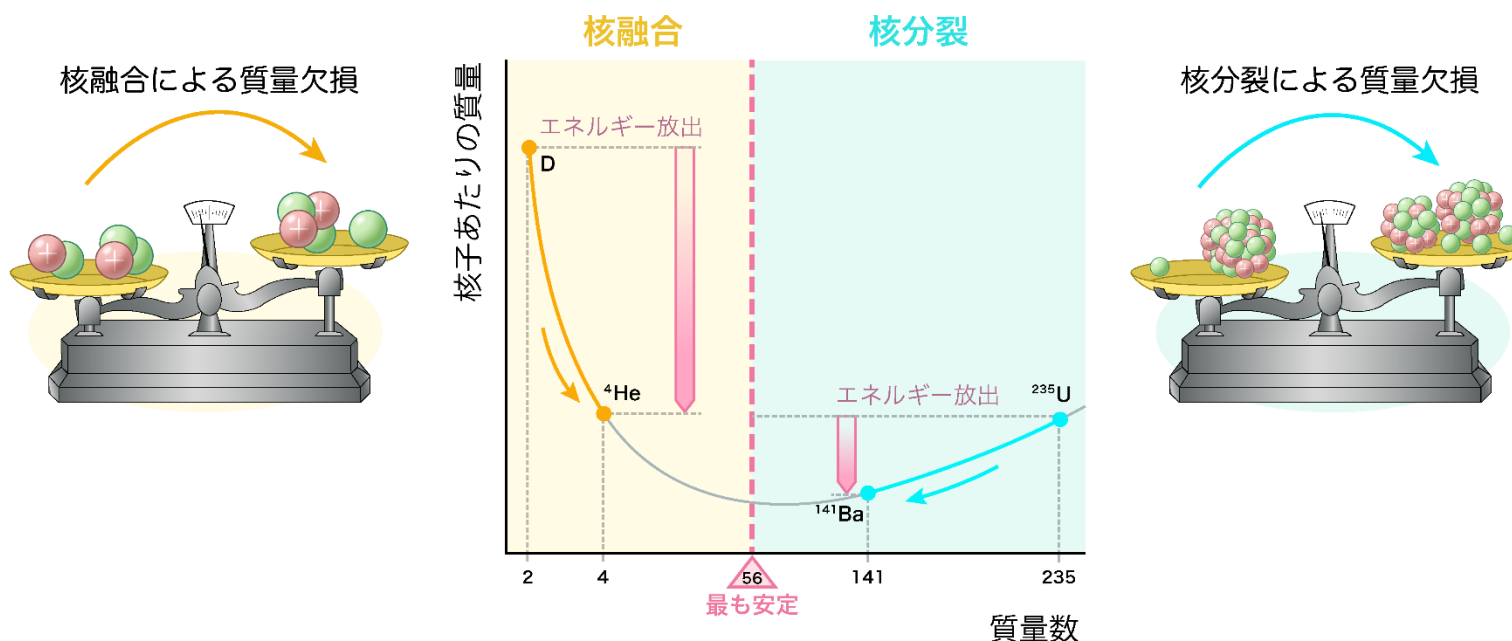
核融合と核分裂でエネルギーが放出される原理—質量欠損

1905年スイス



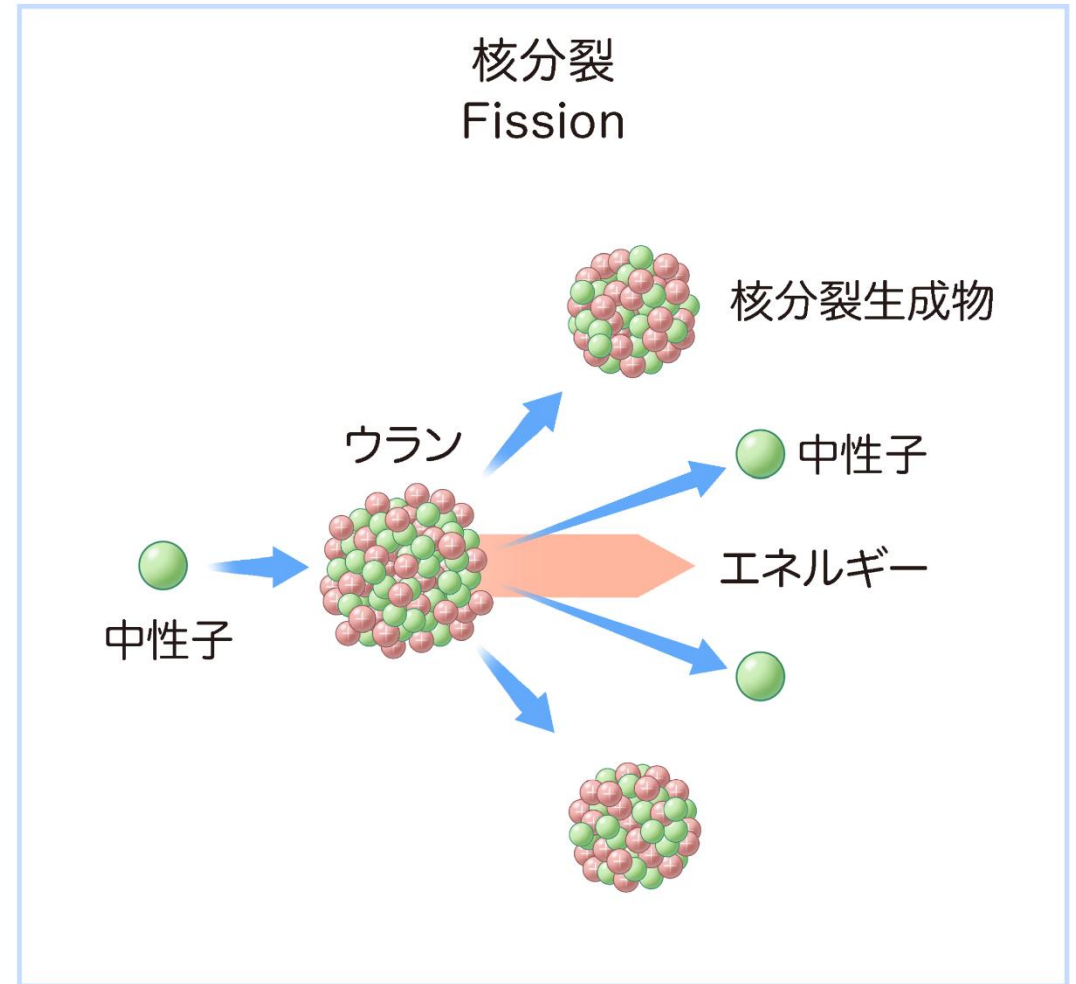
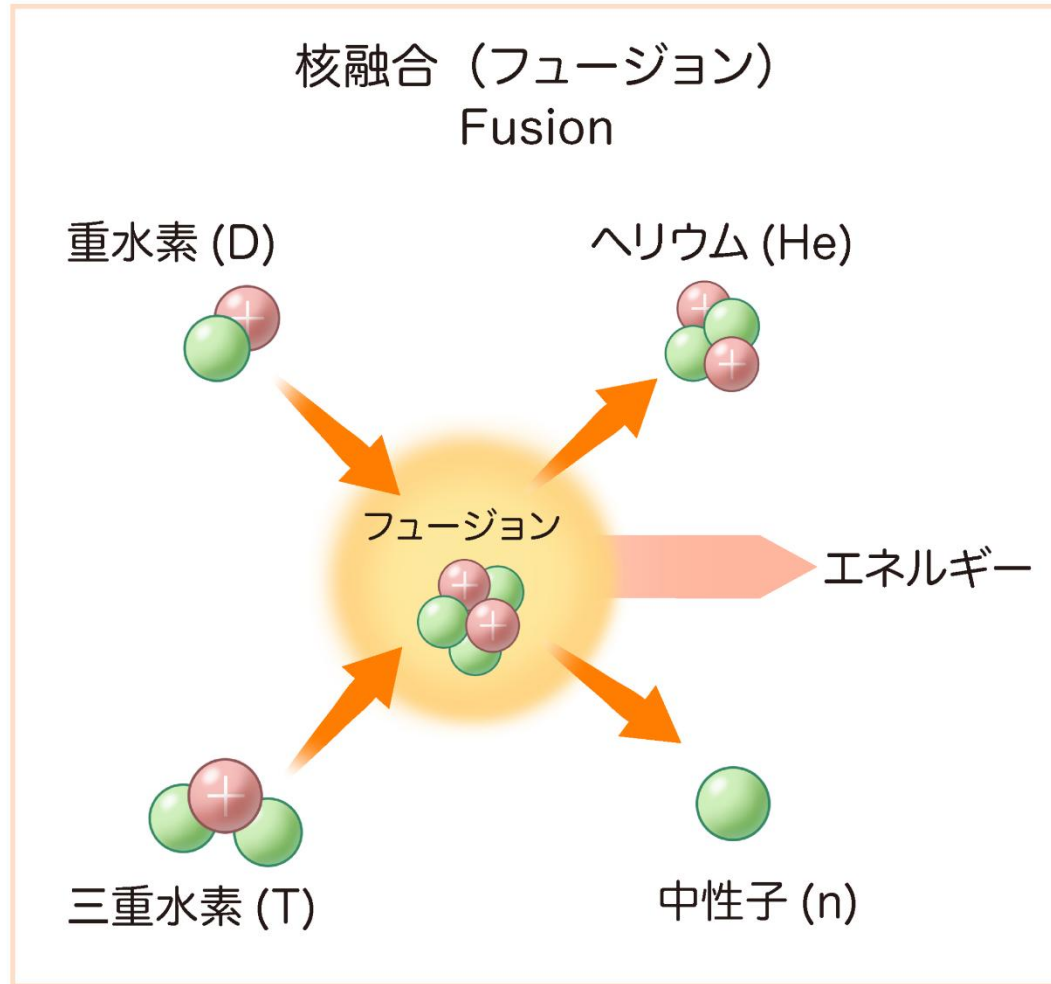
Albert Einstein
Nobel Prize in Physics (1921)

Photo from Wikipedia

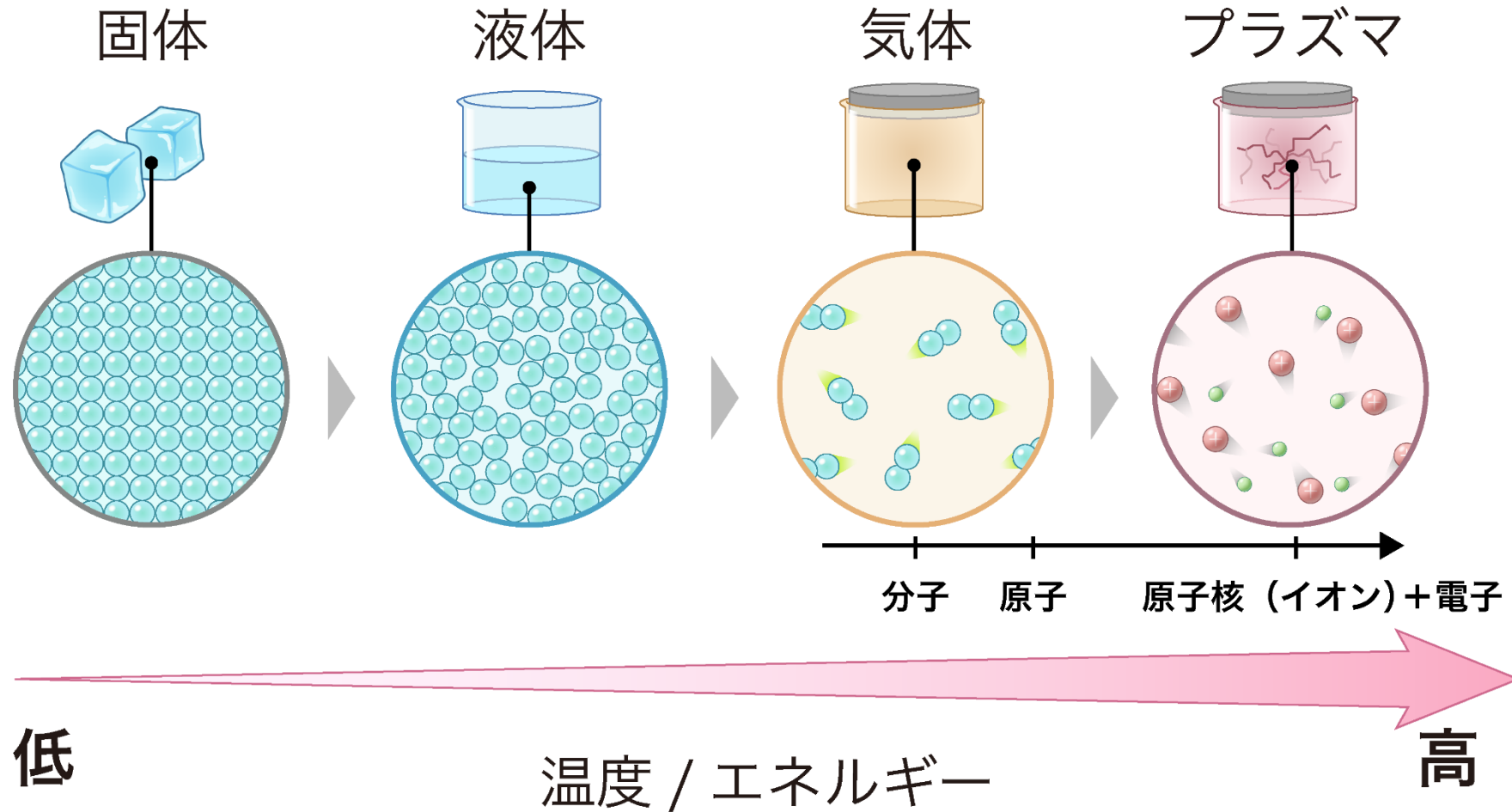


※質量数：陽子と中性子の数の合計
※核子あたりの質量：原子核の重さを、中にある陽子と中性子の数で割ったもの

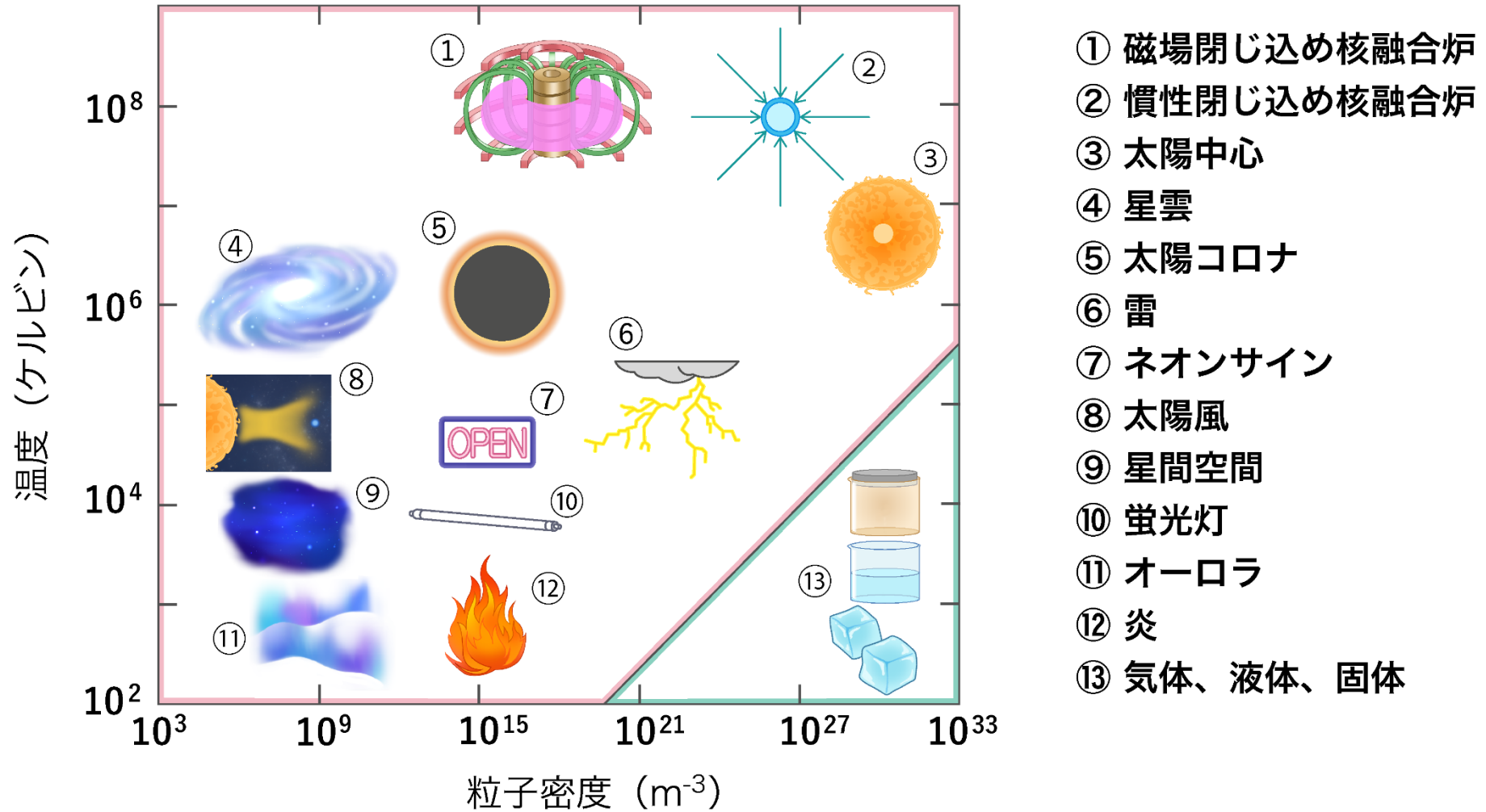
核融合（フュージョン）と核分裂の違い



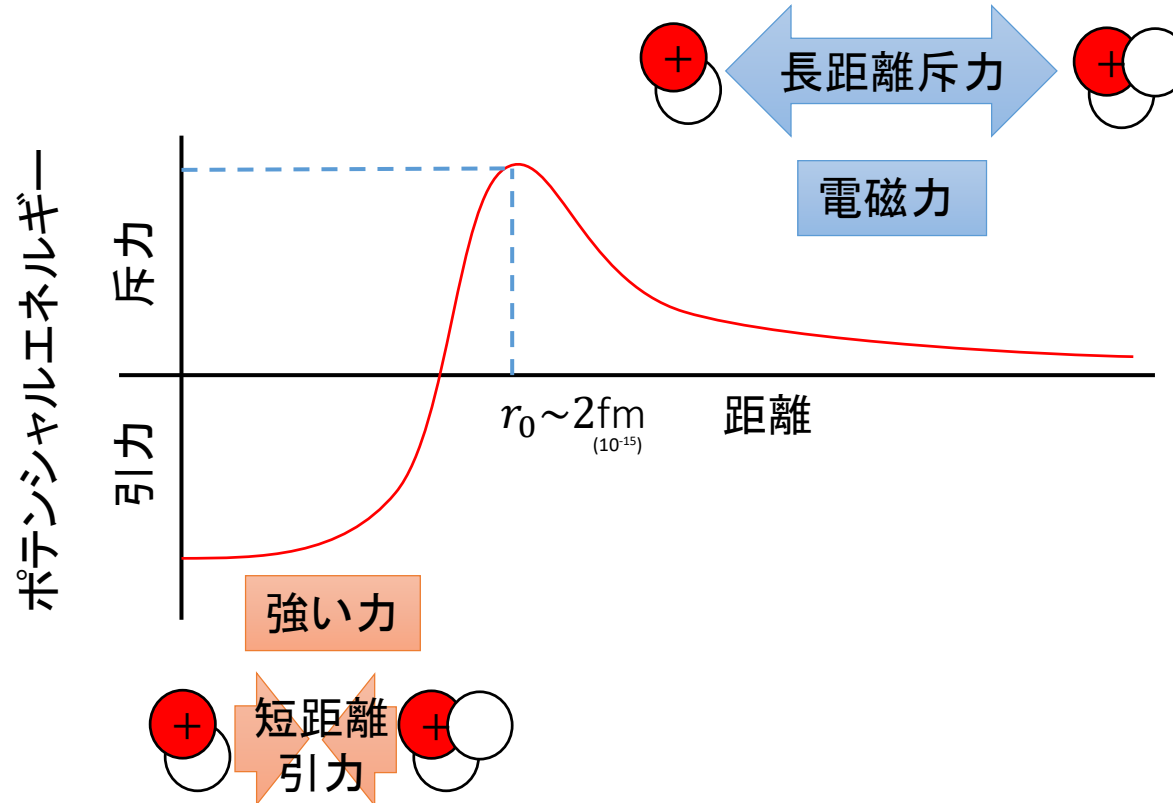
物質の第4の状態ープラズマ



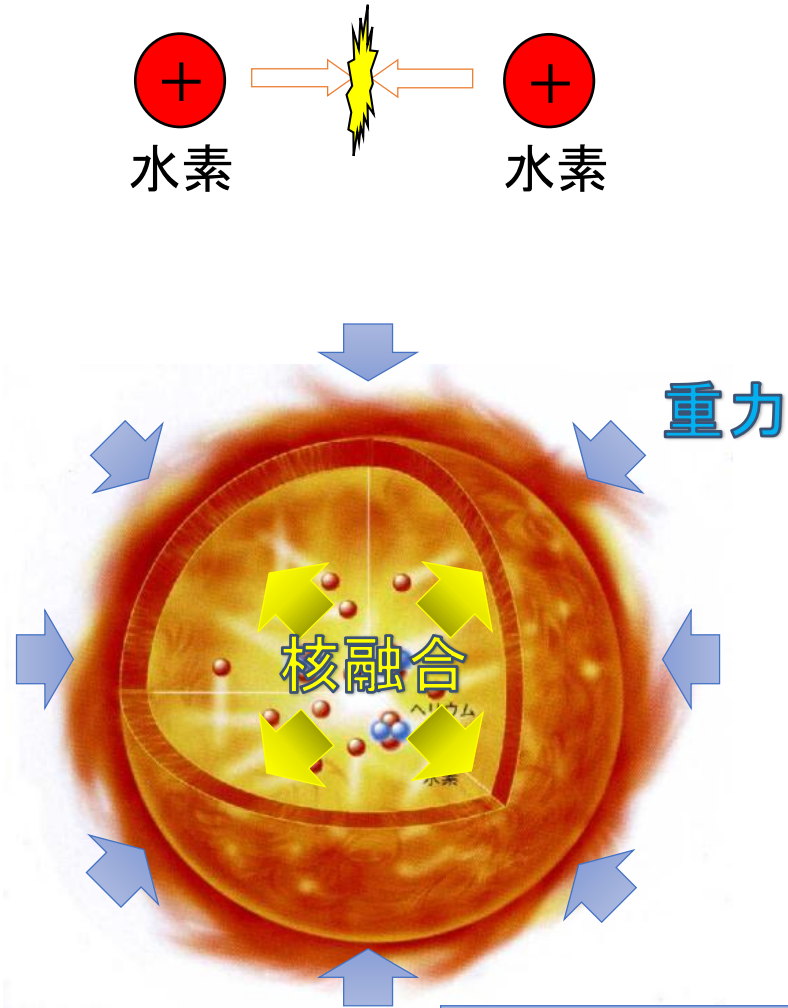
プラズマの温度と粒子密度の関係



原子核を融合させるのはとても困難



太陽の核融合：重力閉じ込めによって達成



組成: 水素(74.9%), ヘリウム(23.8%)

質量: 2×10^{30} kg (地球333 000 個分)

重力: 地球の27.9倍 (表面)

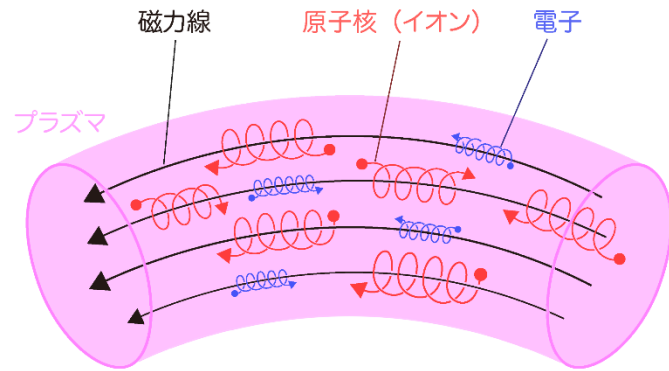
中心部の密度: 162 g/cm^3

中心部の温度: $1500 \text{ 万}^\circ\text{C}$.

水素の核融合によるエネルギー利用は地上では難しい T_T

地上での核融合反応 ⇒ 例えば磁場で閉じ込める

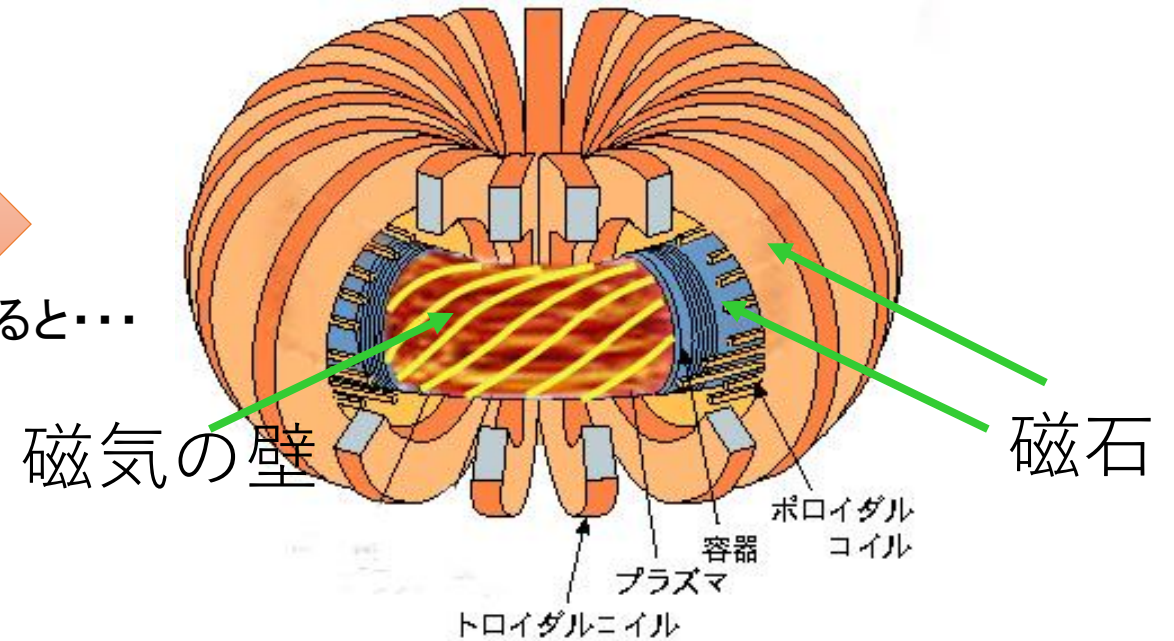
磁場によるプラズマ粒子の閉じ込め



プラズマ中のイオンと電子は磁場に囚われる

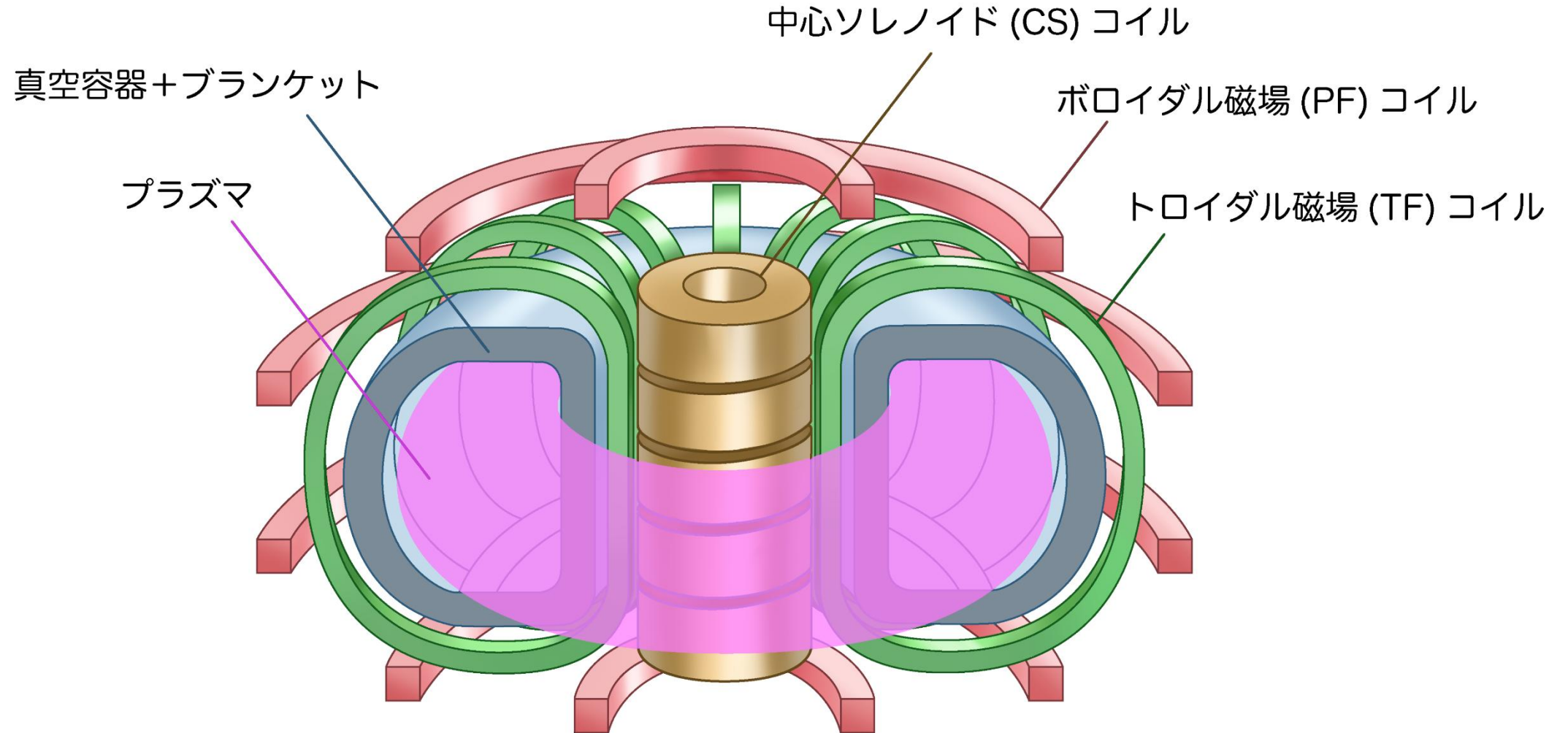


磁場をドーナツ状にすると...

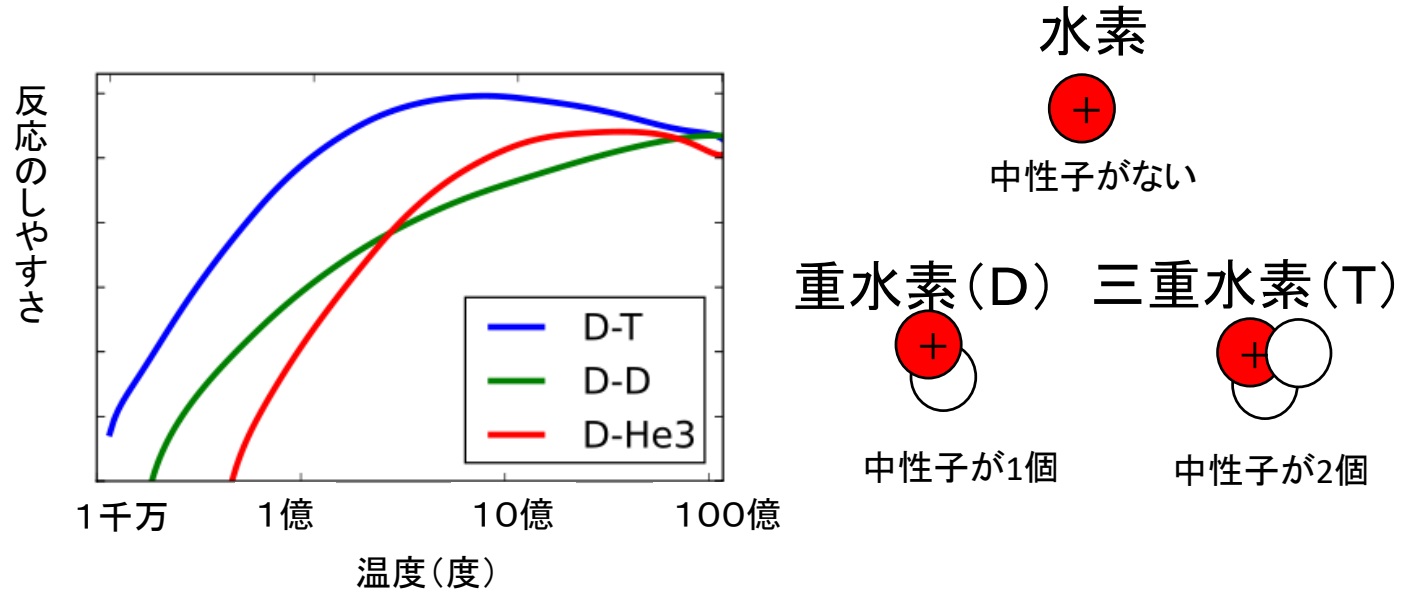


磁石で作ったドーナツ状の磁気の壁で閉じ込めて、核融合反応を持続させる。

トカマク型核融合炉の基本構造



最初の核融合炉では燃料に重水素 (D) と三重水素 (T) を利用する可能性が高い

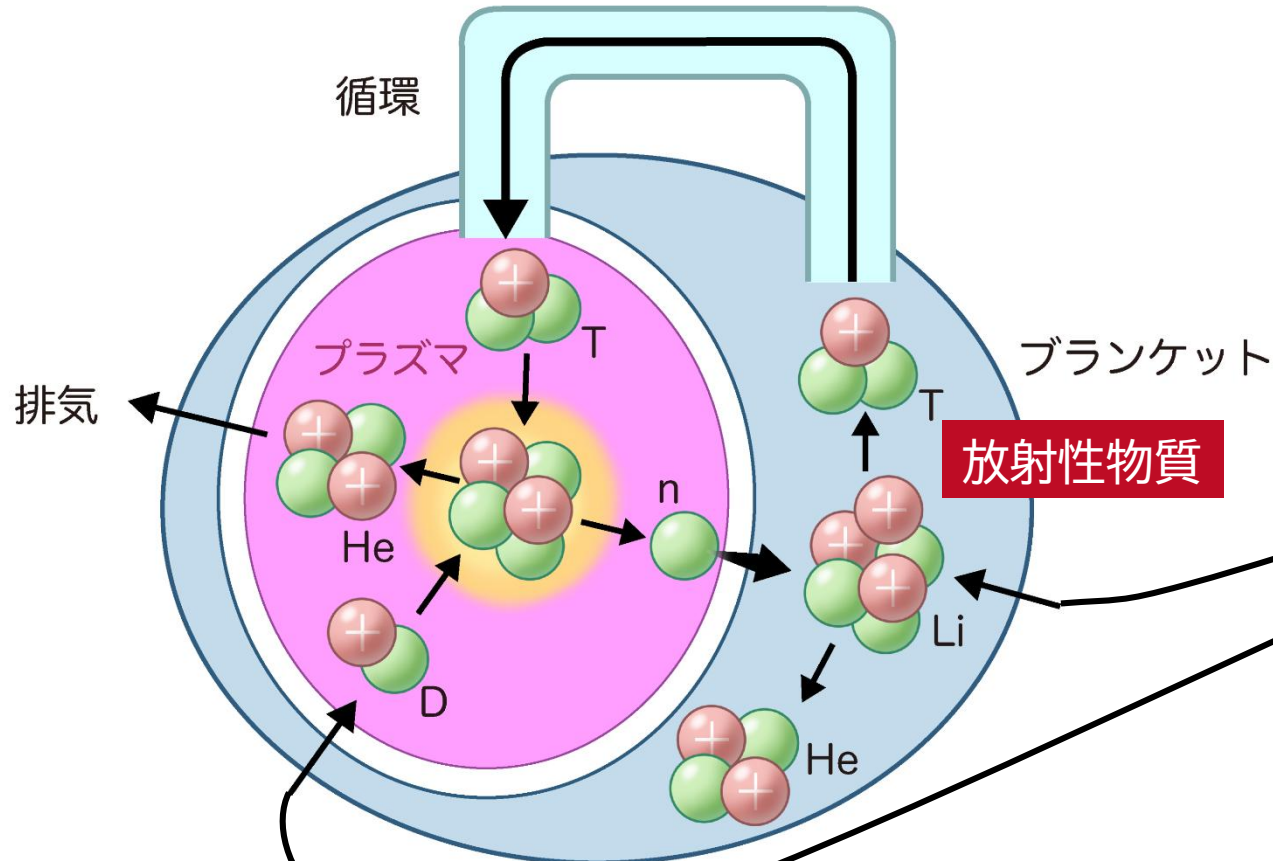


重水素(D)と三重水素(T)の反応が最も容易

D-T核融合炉の燃料資源と特徴

核融合炉内の物質の循環

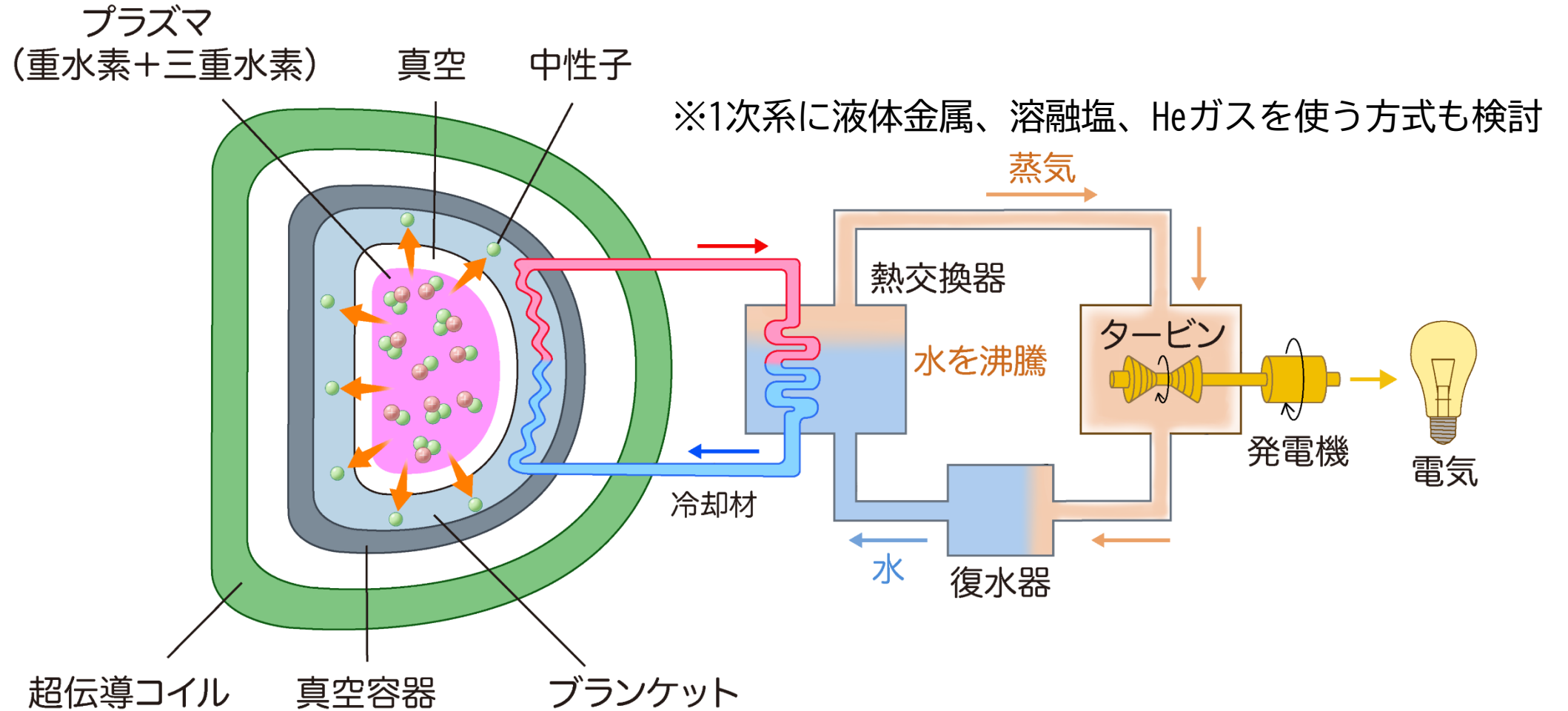
D-T 燃料 1グラム = 8石油換算トン



1500万年分

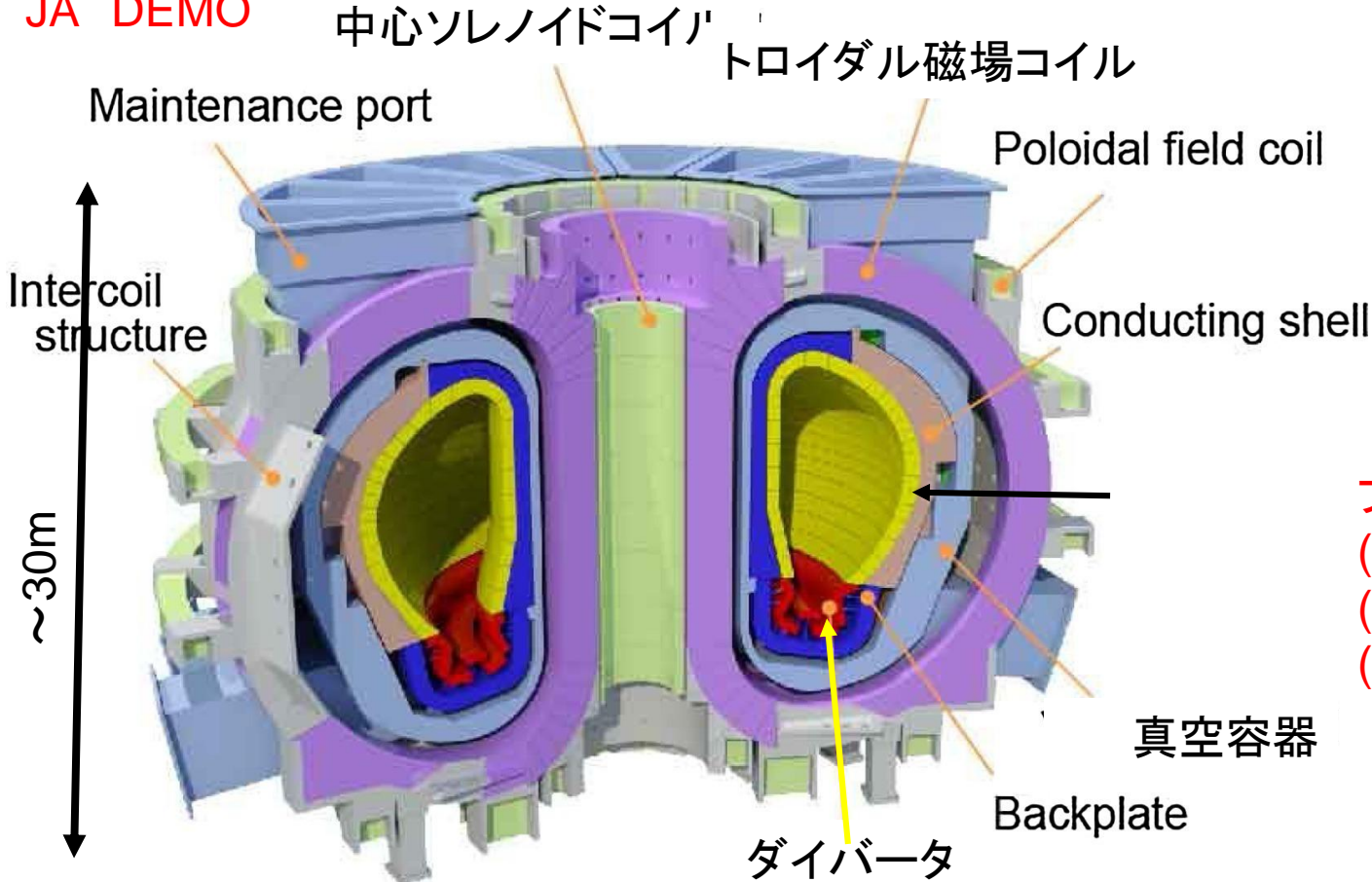
- ◎CO2は出さない
- ◎高レベル放射性廃棄物は存在しない
- ▲放射性物質 (T、放射化物) は存在

核融合炉のエネルギー取り出し方法



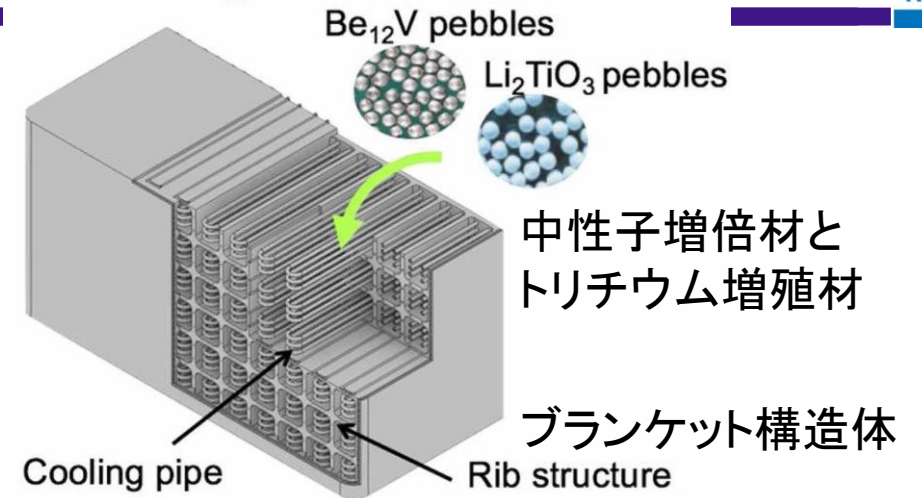
核融合反応のエネルギーを取り出す核融合炉の構成

JA DEMO

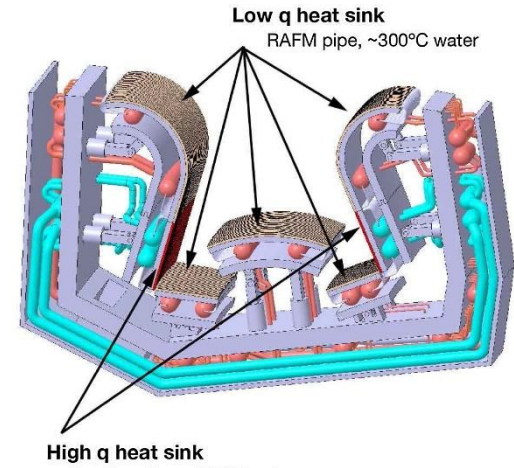


~30m

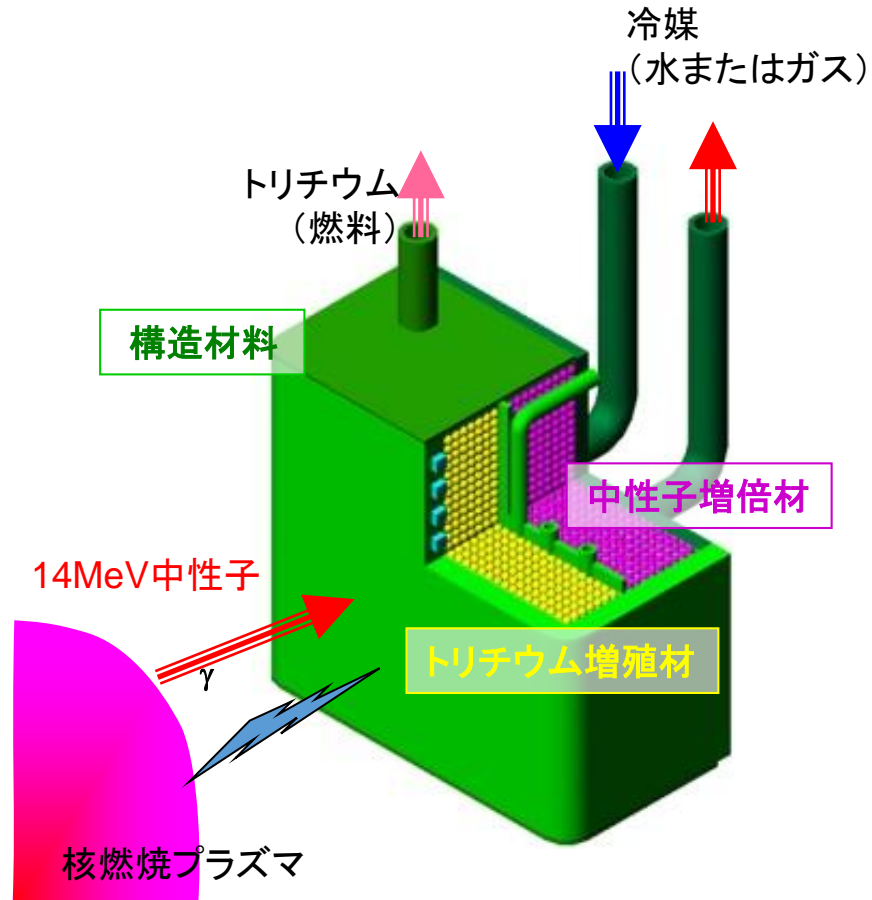
ダイバータ
 ・炉心プラズマ中のHe灰や不純物を排気し、プラズマの純度を保って、燃焼を持続させる。



ブランケット ↑
 (1)中性子のエネルギーを熱に変える
 (2)燃料のトリチウムを作る
 (3)放射線を遮蔽する



核融合ブランケットの特徴



材料に要求される総合的に
満たすべきレベルが高い

①多機能性

- ・燃料生産(トリチウム増殖、中性子増倍)
- ・熱エネルギー発生
- ・中性子遮蔽
- ・真空機器

②極限環境性

- ・14MeV中性子照射
- ・高エネルギーイオン照射(第一壁表面)
- ・冷却材(水、Heガス、液体金属)との共存
- ・電磁力(ディスラプション)

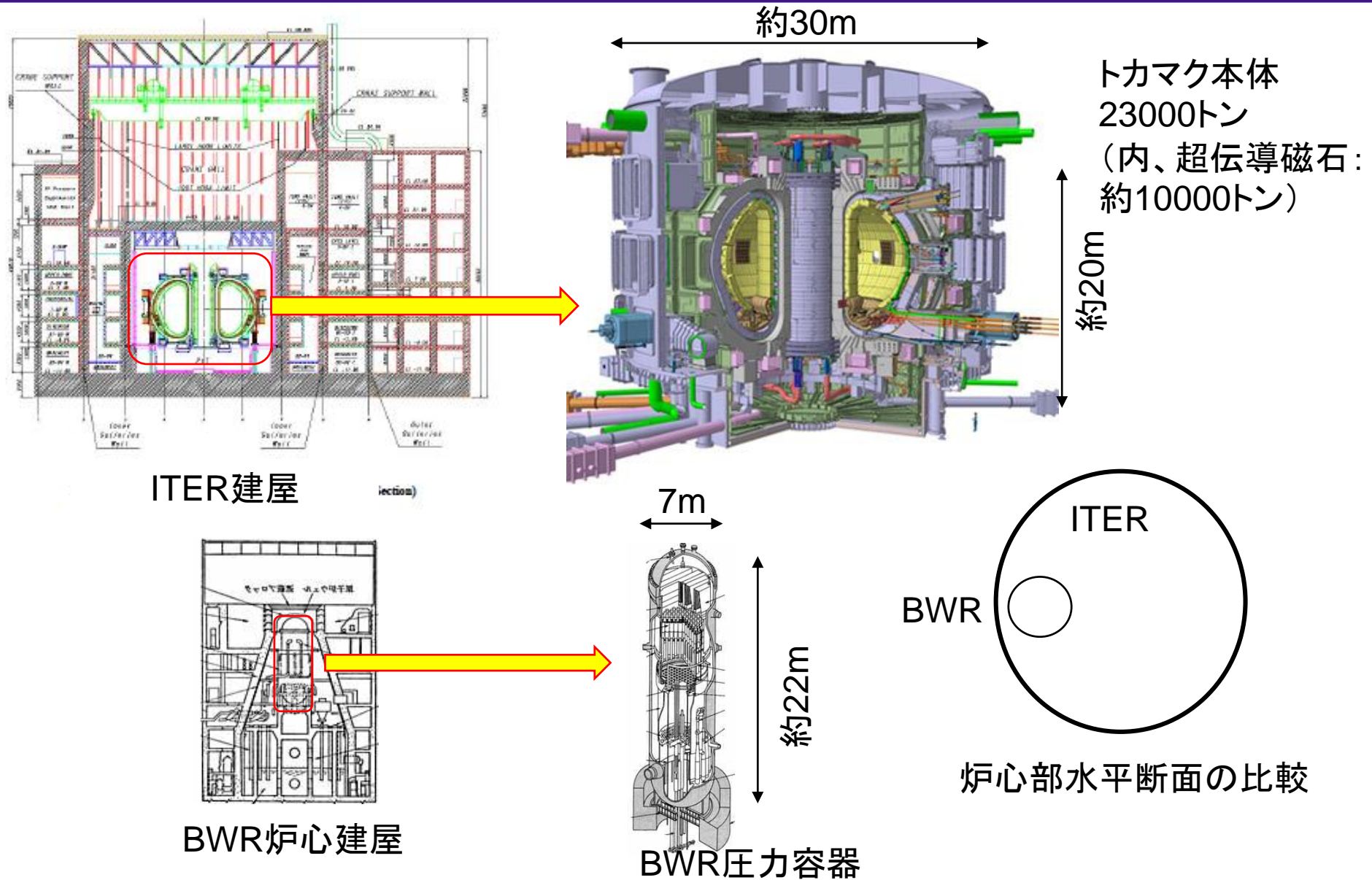
③材料複合システム

- ・構造材、増殖剤、増倍材
- ・接合(溶接、HIP)
- ・第一壁被覆(W、Be等のアーマー)
- ・トリチウム透過防止被覆

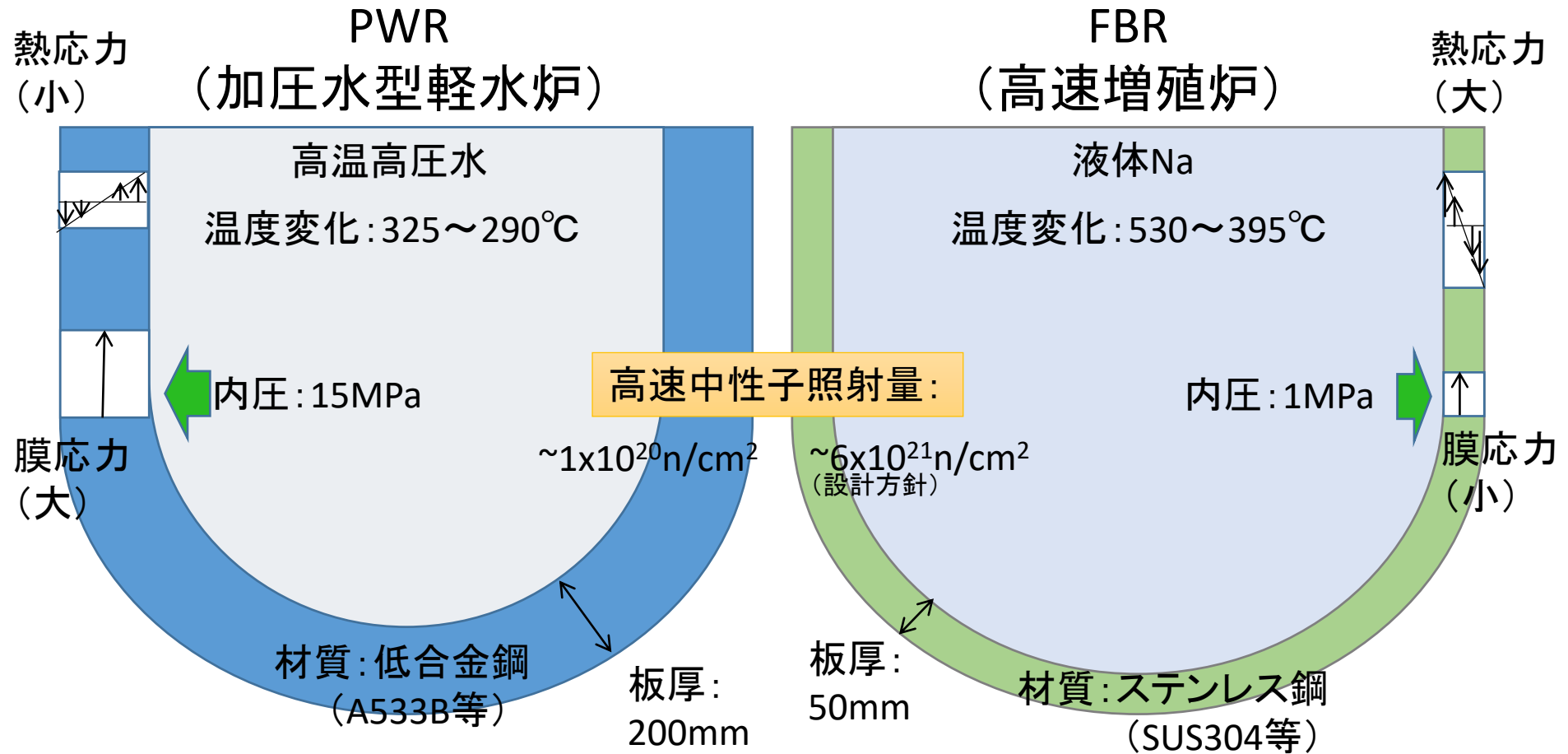
④相互関係、多様性、階層性

- ・上記の各項目は互いに独立では無い
- ・かつ多様な組み合わせの可能性が存在
- ・マルチフィジクス+マルチスケール性

核融合炉と核分裂炉の炉心部分の大きさ比較



原子炉容器（軽水炉・高速炉）における力学環境



低温: 非クリープ領域

延性破壊・塑性崩壊、過大な塑性変形
疲労破損、弾塑性座屈

高温: クリープ領域

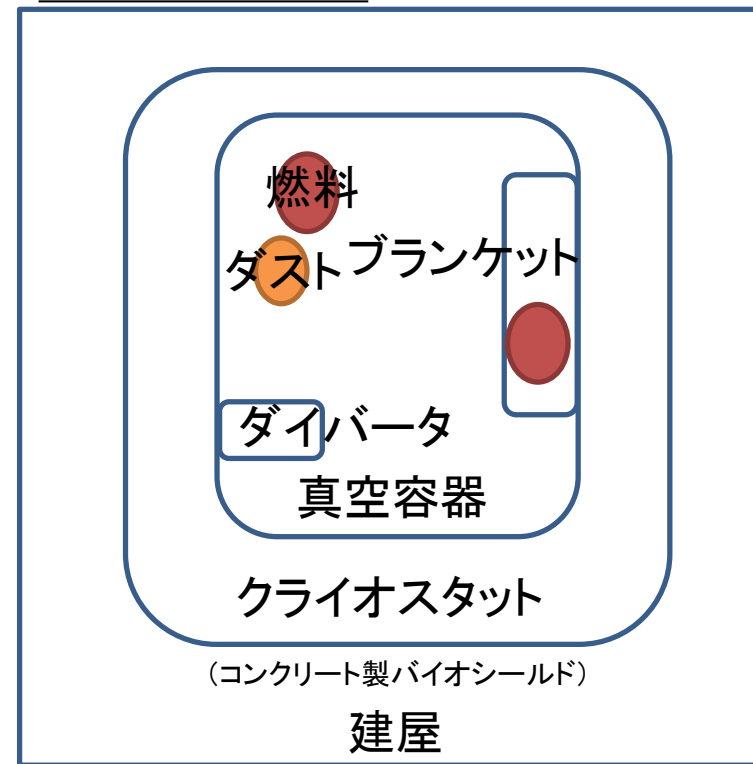
+ クリープ破断、過大なクリープ変形
+ クリープ疲労破損、クリープ座屈

核融合炉と軽水炉のバウンダリの比較

軽水炉



DT核融合DEMO炉



燃料、FP	UO ₂ 、FP (MA等)	(核燃料)	~5yrs
燃料被覆管	Zr合金	※1	~5yrs
压力容器	低合金鋼	Class 1	>40yrs?
格納容器	コンクリート(鋼製内張)	Class MC	>40yrs?

燃料、ダスト	T、W等ダスト	(RI)	-
ブランケット	RAF鋼、増殖材等	?	3~5yrs
真空容器	316LN IG(ITER)?	?	>40yrs?
クライオスタット	316LN IG(ITER)?	?	>40yrs?

※1 規制基準は原子力安全委員会の指針(機械的に破損しないこと)、専門部会報告書の指針を満足するための具体的基準(被覆管平均塑性歪が1%以下であること)

フュージョンエネルギーを取り巻く状況

炉工学への投資は十分か？

巨大科学は巨額の経費を要する

日本の実質GDP: 532兆円

日本の科学経費
(2011)
148,389M\$
18兆円

中国の科学経費
(2012)
243,293M\$
29兆円

米国の科学経費
(2012)
453,544M\$
54兆円

科研費総額
(2276億円: 2014年度)

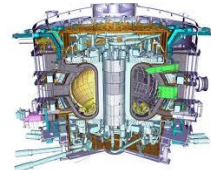
国立大学の教員一人あたりの研究費
は、年間653万円(2016年度決算)



アルマ天文台
1,430M\$
0.17兆円



LHC
5,370M\$
0.6兆円



ITER

19,660M\$
2.4兆円

アポロ計画
約104,270M\$
13兆円

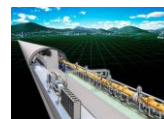
国際宇宙
ステーション
(ISS)
約140,000M\$
17兆円



京
0.11兆円



人ゲノム計画
4,730M\$
0.56兆円



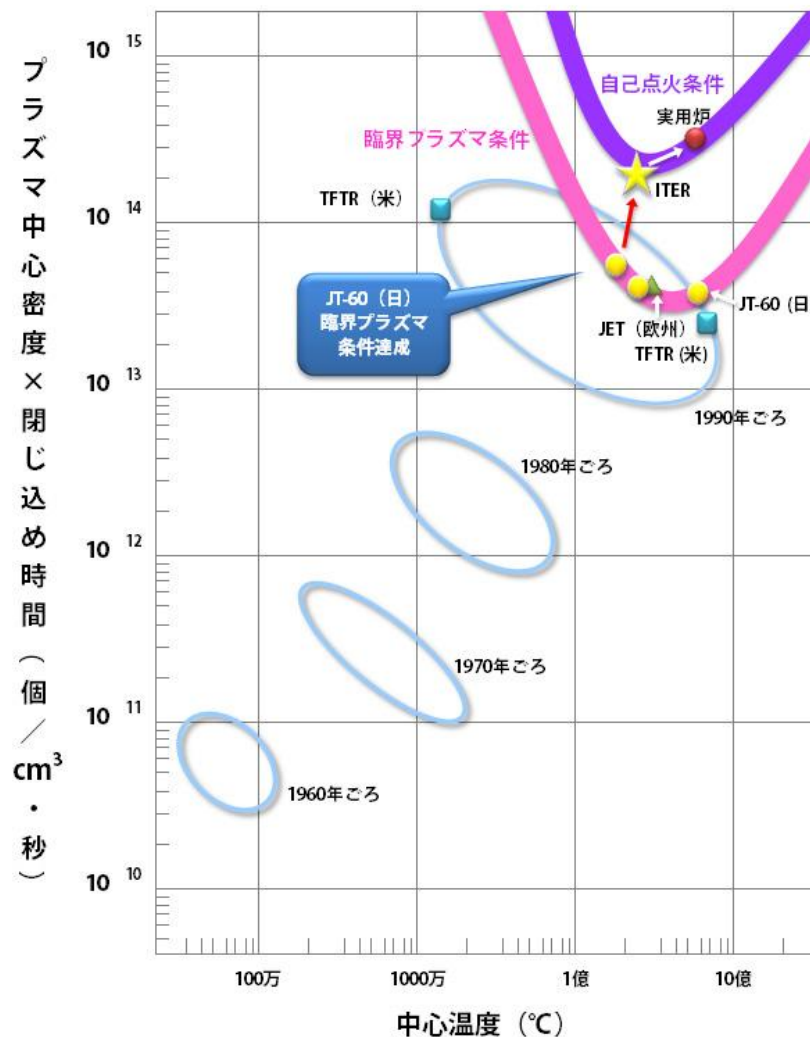
ILC
1兆円

フュージョンエネルギーの金額は確かに大きい

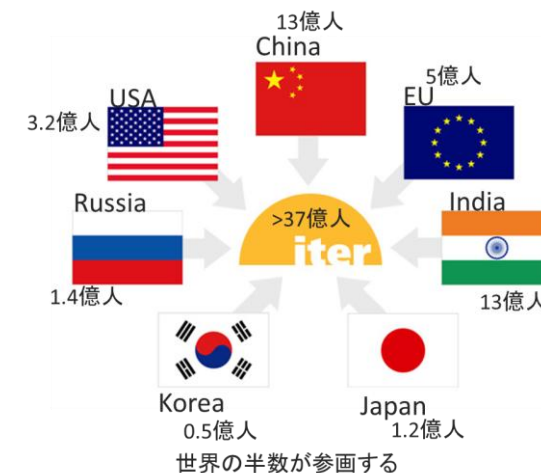
(遅れつつも) 国際協力で建設が進む実験炉ITER



核融合実験炉の目標



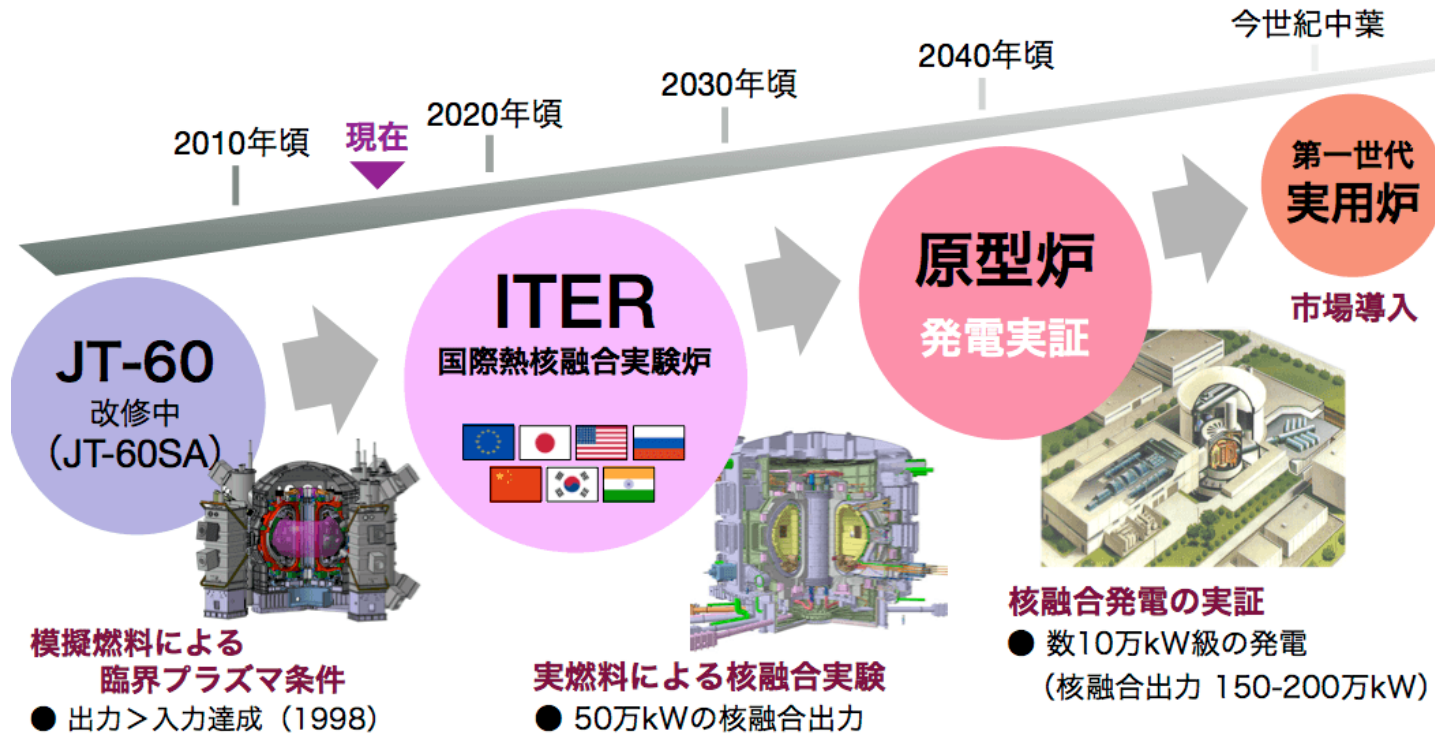
- 500MWの核融合出力を400s持続
➤ エネルギー増倍率Q=10
- 核融合炉技術の統合運転を実証
- 内部加熱により持続するDTプラズマの達成
- トリチウム増殖試験
- 核融合機器の安全性を実証



核融合炉実現に向けたかつての日本の段階的アプローチ



核融合開発のロードマップ: 今後の核融合研究開発の推進方策について
(2005年11月 原子力委員会)



<http://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/project/reactor-sp.html>

世界において活発化する核融合スタートアップ

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



GAFANAなどによる核融合炉スタートアップ企業への投資が活発化



米中の民間核融合の状況



国	企業	炉概念(方式)	燃料種(公表ベース)	資金調達状況(公開情報)	エビデンス
米国	Commonwealth Fusion Systems (CFS)	高磁場トカマク(HTS磁石)	D-T(一般にDT設計)	Series B2: \$863M(2025-08-28)	公式発表 (cfs.energy)
	Helion Energy	パルスFRC(直接発電志向)	D-He3(主張)	\$425M調達・評価\$5.4B(2025-01-28報道) / 累計\$1B超(報道)	Reuters/FT (Reuters)
	TAE Technologies	ビーム駆動FRC	p-B11(目標)	\$150M超のラウンド(2025-06-02)	公式発表 (TAEテクノロジーズ)
	Zap Energy	せん断流安定化Zピンチ	未公表(実験燃料はDの記載例あり / 商用DTは断定せず)	Series B: \$27.5M(2021-05-19) / 追加\$160M(2022-07頃: ARPA-E記載)	公式発表+ARPA-E (Zap Energy)
	Type One Energy	ステラレータ(Infinity Two)	未公表(一次情報で明記確認できず)	Convertible note: \$87M(2026-01-14報道)、総額\$160M超(報道)	TechCrunch/Yahoo (TechCrunch)
	Thea Energy	平面コイル型ステラレータ	未公表(燃料明記は薄い)	Series A: \$20M(2024-02-08)	公式発表 (Thea Energy)
	Realta Fusion	磁気ミラー(axisymmetric mirror)	未公表(DTを明示した一次情報は薄い)	\$36M(2025-05-13報道) / Seed \$9M+DOE賞金等の経緯	TechCrunch+記事 (TechCrunch)
	Xcimer Energy	レーザー慣性核融合(エキシマ)	未公表(DTが典型だが断定せず)	Series A: \$100M(2024-06-04)	公式発表 (Xcimer Energy)
	SHINE Technologies	加速器+ターゲット(核融合中性子源) ※中性子源・同位体が主	D-T(用途として明示)	累計\$414M(DB集計) ※DB根拠	Tracxn (Tracxn)
	Pacific Fusion	パルス電磁駆動の慣性核融合(IFE系)	未公表	Series A: \$900M(2024年に“約束/コミット”と報道)	TechCrunch (TechCrunch)
Helicity Space	核融合推進(Helicity Drive) ※推進・宇宙用途	未公表(“hydrogen isotopes”程度)	Seed: \$5M(2023-12-11)	Business Wire (ビジネスワイヤ)	
中国	能量奇点(Energy Singularity)	HTSコンパクト・トカマク(HH70等)	未公表	Pre-A: 近4億元(2023-04-30) / 累計近8億元(同ページ)	公式発表 (エネルギー奇点)
	星环聚能(Startorus Fusion)	球状トカマク(SUNIST系)	未公表	A輪: 10億元(2026-01-12/13報道)	証券時報等 (东方财富網)
	瀚海聚能(HHMAX)	直線型FRC	未公表	天使輪: 数千万元(2024-08-19報) / 他記事で累計>5000万元の示唆	記事 (創投之家)
	新奥(ENN)	球状トーラス(ST)p-B志向	p-B(公式明記)	(スタートアップの外形ではなく大企業R&D: VC調達としての“ラウンド”は不明確)	公式説明 (en.ennresearch.com)
	诺瓦聚变(NovaFusionX)	(方式の一次情報がまだ薄い: 分散型/小型化志向の説明はある)	未公表	天使輪: 5億元(2025-08-01報)	公表/報道 (companies.caixin.com)

そして日本でも・・・ただ少し違う？！



日本でも核融合ベンチャーが設立



Japan
Fusion Energy
Council

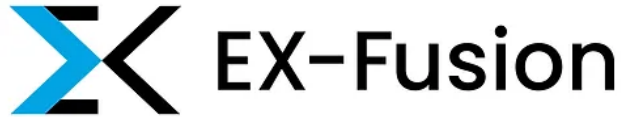
一般社団法人フュージョンエネルギー産業協議会



2019年10月1日 京都大学 核融合炉工学(＋球状トカマク)

炉工学！

小西哲之 京大名誉教授(笠田の前ボス)、荻野助教が共同研究



2021年7月1日 大阪大学 レーザー閉じ込め方式

森芳孝准教授(笠田の若手活動仲間)



2021年10月22日 核融合科学研究所 ヘリカル磁場閉じ込め方式

宮澤順一 元NIFS教授(笠田の若手活動仲間)、共同研究中

炉工学！



2023年5月16日 量子科学技術研究開発機構 ベリリウム精製技術

中野徹 CTO(笠田の社会人博士)、笠田が社名を命名

炉工学！



2023年7月6日 量子科学技術研究開発機構 リチウム回収・精製技術

星野毅(笠田の若手活動仲間)

炉工学！



2023年9月29日 筑波大学&日本大学 線形磁場閉じ込め方式

坂本瑞樹筑波大教授(笠田と原型炉TF)、
浅井朋彦日大教授(笠田とアウトリーチ関連活動)

核融合炉の実現が難しい3段階の理由と状況

1. 科学的成立性（プラズマ科学的課題）

- 核融合反応に必要な高温・高密度のプラズマを保持することが難しい。
- 実際に核融合プラズマを長時間持続させていない。

基礎科学の文脈において
(エネルギー問題解決の期待を
抱かせつつ) 長年の研究投資

ITERやJT60SAに集約

2. 技術的成立性（核融合炉工学的課題）

- 核融合炉システムを年単位で動かし続けることが難しい。
- 核融合反応エネルギーを、効率的に電力に変換するのが難しい。
- 高エネルギー粒子線（特に中性子）照射に対して構造材料が持つかどうかの確証がない。
- 放射性物質（三重水素燃料等）の安全管理
- 広範な領域の科学・技術が関わる総合科学技術であるため、全てを把握してプロジェクトを進めることが難しい。

圧倒的
投資不足

3. 社会的成立性（社会経済学的課題）

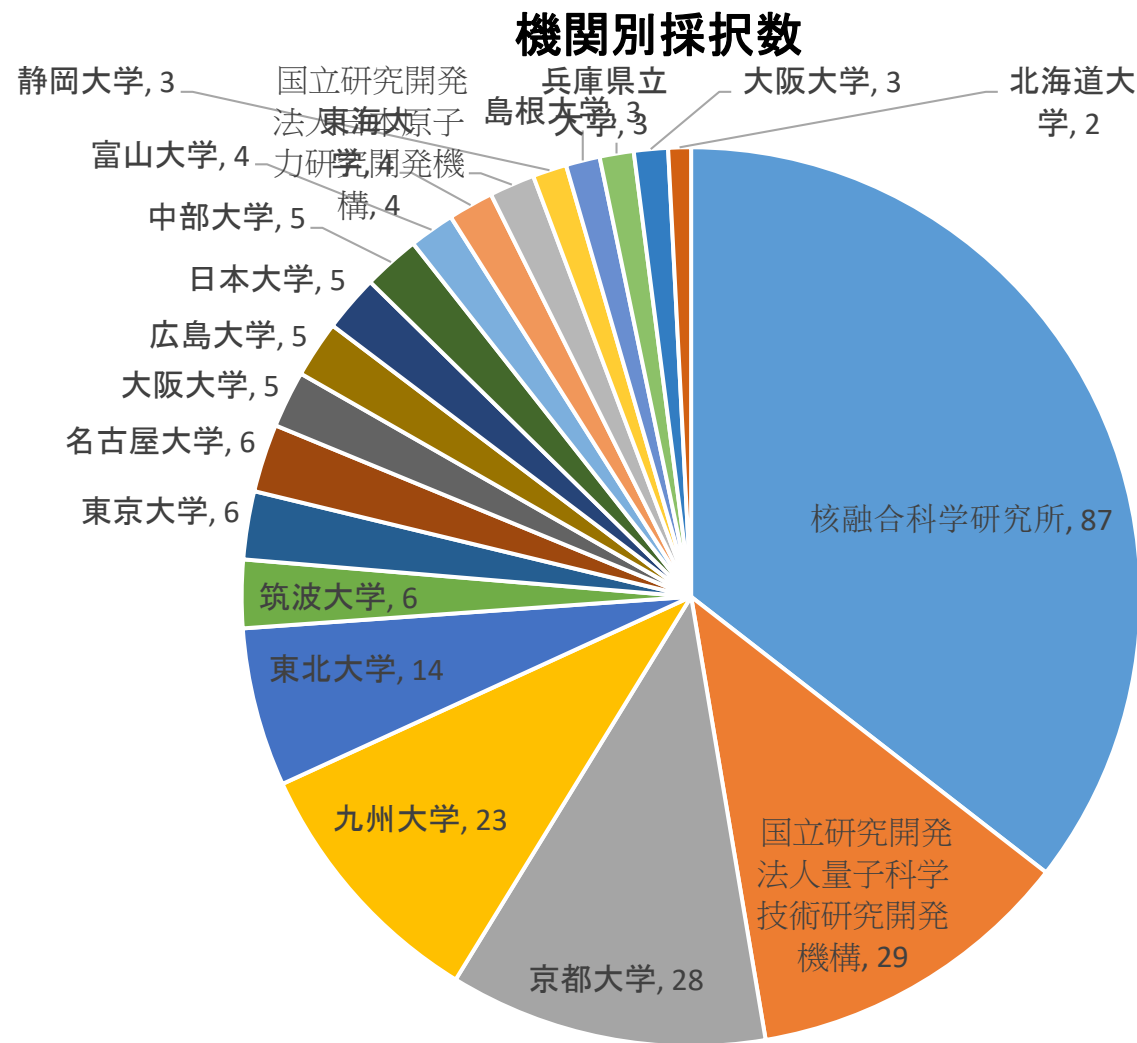
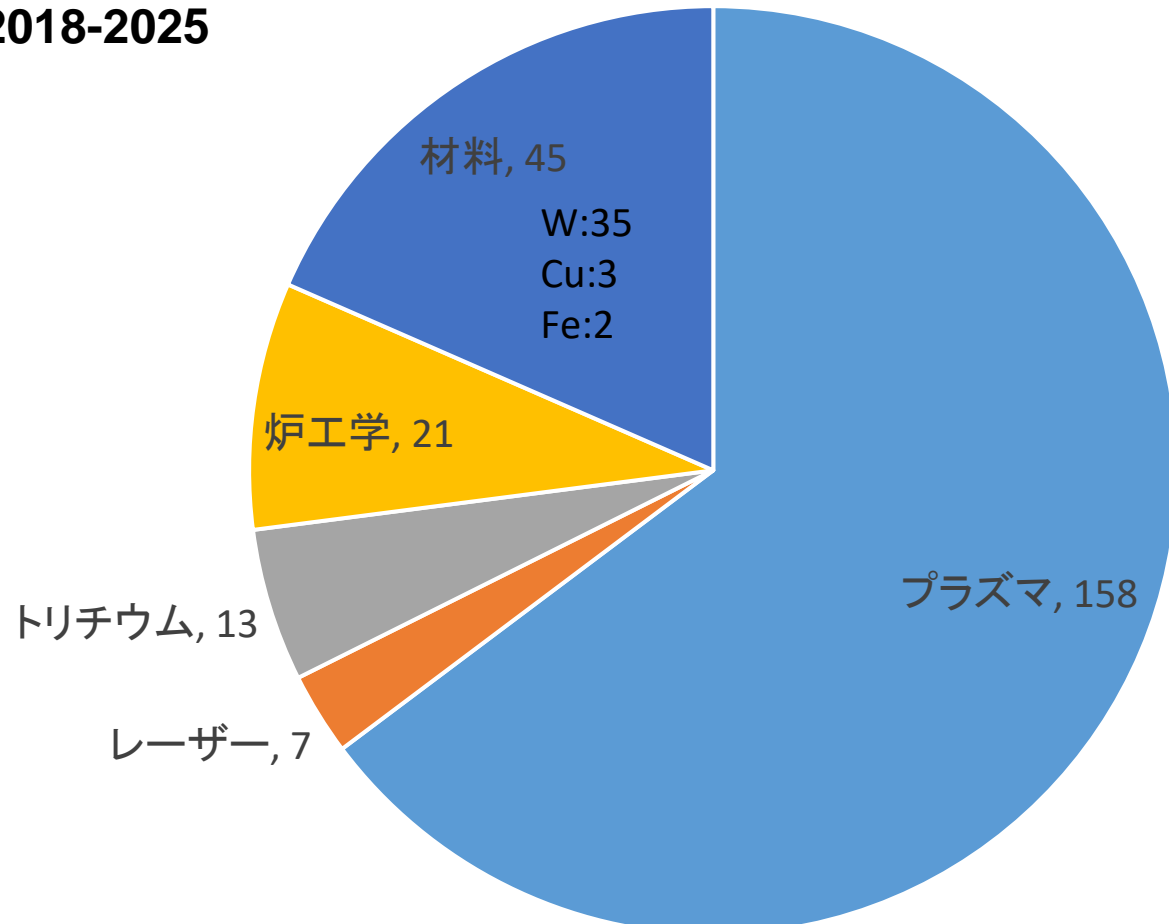
- 現状、とても高価。
- 安全に対する懸念。
- そもそも認知度が低い・・・

リスクに対するアップストリーム
エンゲージメントの必要性

核融合炉工学分野への投資不足のエビデンスの例

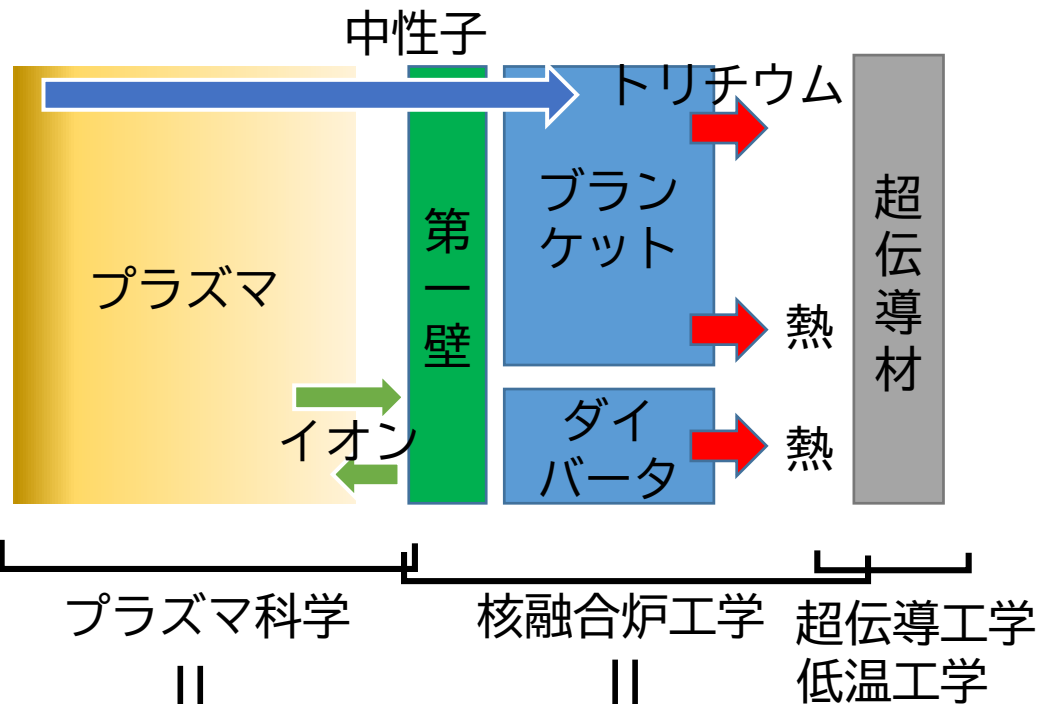


検索結果: 263件 / 審査区分/研究分野:
 [審査区分:審査区分]小区分14020:核融合学関連
 2018-2025



科研費の中区分14プラズマ学およびその関連分野の小区分「核融合学関連」では、「材料」の課題でも大半がプラズマと関わるW関連のテーマであり、中性子照射影響を対象とする課題の採択は少ない

核融合炉の仕組みとこれまでの研究者コミュニティ構成の問題



第一壁の表面に用いられるタングステン材料のみが周辺プラズマの文脈においてプラズマ科学者から見えている

※プラズマに曝される材料の限界は物性（質量数）で基本的に決まるので、材料開発の余地が極めて少ない。
※T燃料サイクルや表面形状の観点からは興味深い。

プラズマ研究者からは**中性子**は見えない

vs. **中性子？ナニソレ美味しいの？**

核融合炉工学研究者の大半からは**プラズマ**が見えない

中性子が出てナンボ

中性子が無くても
成立する分野⇔原子力分野との関連性が弱い

中性子が必須の分野⇔原子力分野との関連性が強い

所属コミュニティが異なる

結果として、核融合炉工学分野に核融合研究開発資金が流れにくい構造

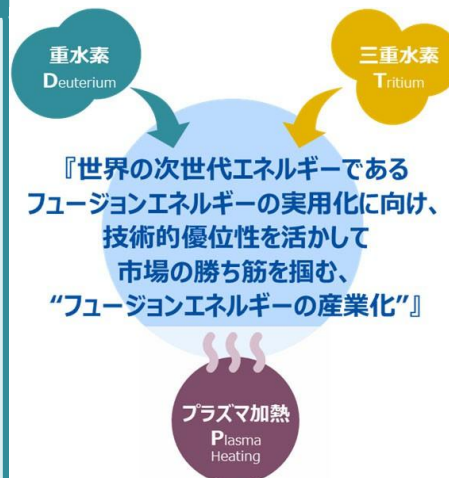
プラズマを閉じ込める自信が無いプラズマ研究者は「材料」をスケープゴートにし、プラズマに関わる一部の核融合工学研究者との共犯関係が成立していたが、直接中性子に関わる核融合炉工学分野の大半は置き去りに・・・



ITER計画/BA活動の知見や新興技術を最大限活用し、世界に先駆けた2030年代の発電実証を目指し、**バックキャストによるロードマップを今後策定するとともに、QST等のイノベーション拠点化を推進し、フュージョン産業エコシステムを構築**

(1)フュージョンインダストリーの育成戦略 Developing the Fusion industry

- ①**産業協議会(J-Fusion)との連携**
(国際標準化、サプライチェーンの構築、知財対応、ビジネスの創出、投資の促進等)
- ②**科学的に合理的で国際協調した安全確保**
(当面は、RI法の対象として位置づけ。新たな知見や技術の進展に応じて、アジャイルな規制を適用。G7やIAEA等との連携など、国際協調の場も活用)
- ③**社会実装の促進**に向けたTFの設置
(現状の技術成熟度の評価に加え、実施主体の在り方やサイト選定の進め方等について検討)



(2)フュージョンテクノロジーの開発戦略 Technology

- ①**原型炉実現に向けた基盤整備の加速**
(工学設計や実規模技術開発等、原型炉開発を見据えた研究開発の加速。ITERサイズの原型炉の検証)
- ②**スタートアップを含めた官民の研究開発力強化**
(NEDO、JST、QST等の資金供給機能の強化の検討。技術成熟度の高まりやマイルストーンの達成状況に応じ、トカマク、ヘリカル、レーザー等多様な方式の挑戦を促進)
- ③ITER計画/BA活動を通じた**コア技術の獲得**
(日本人職員数の増加や調達への積極的な参画促進。様々な知見を着実に獲得し、その果実を国内に還元)

炉工学分野の重要性

(3)フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等 Promotion

- ①**内閣府が政府の司令塔**となり、関係省庁と一丸となって推進
(世界に先駆けた2030年代の発電実証の達成に向けて、必要な官民の取組を含めた工程表の作成)
- ②QST、NIFS、ILE等の**イノベーション拠点化**
(産学官の研究力強化及び地方創生の観点から、スタートアップや原型炉開発に必要な大規模施設・設備群の整備・供用)
※QST:量子科学技術研究開発機構、NIFS:核融合科学研究所、ILE:大阪大学レーザー科学研究所 ※(2)①②と連動
- ③**大学間連携・国際連携による体系的な人材育成システム**の構築と育成目標の設定
(核融合科学研究所(NIFS)が中核となり、教育プログラムを実施。ITERをはじめ、海外の研究機関・大学等に人材を派遣)
- ④**リスクコミュニケーション**による国民理解の醸成等の環境整備
(J-Fusionや関連学会等とも連携し、社会的受容性を高めながら、関係者が協調して活動を推進)

中性子照射、中性子照射材、トリチウムに関する投資は見えにくい



「核融合原型炉等に向けた核融合技術群の実証」採択事業の概要

代表スタートアップ：株式会社 MiRESSO 事業計画名：核融合炉用ベリリウム資源安定確保に係る低温精製技術実証 交付額上限：20 億円
代表スタートアップ：株式会社 Helical Fusion 事業計画名：核融合炉用高温超伝導導体の開発 交付額上限：20 億円
代表スタートアップ：LiSTie 株式会社 事業計画名：リチウムの国内安定調達を可能とする革新的 LiSMIC の開発 交付額上限：15 億円
代表スタートアップ：京都フュージョニアリング株式会社 事業計画名：核融合炉向け革新的ブランケットシステム開発事業 交付額上限：10 億円

事業の目的及び概要について

本補助金は、文部科学省の中小企業イノベーション創出推進事業を実施するため、文部科学省が中小企業イノベーション創出推進基金を造成し、当該基金を活用して、革新的な研究開発を行う中小企業（「スタートアップ等」）による研究開発を促進し、その成果を国主導の下で円滑に社会実装し、我が国のイノベーション創出を促進するための制度（「SBIR (Small / Startup Business Innovation Research) 制度」）において、スタートアップ等が社会実装に繋げるための大規模技術実証（フェーズ3）を実施し、我が国におけるスタートアップ等の有する先端技術の社会実装の促進を図ることを目的とします。

弊機構は基金設置法人として、基金を用いて、国が定める「指定補助金等の交付等に関する指針」等に沿って、文部科学省と共同して上記の事業の目的を達成するために行う補助事業者（「スタートアップ等」）に対する補助金の交付等の業務について実施いたします。事務局業務等については、文部科学省と共同し、当該業務を受託事業者に委託いたします。

**スタートアップにおける炉工学分野
開発研究への補助**

※上記の掲載順は、応募申請順に基づくものである。

内閣府ムーンショット計画目標10



プロジェクトマネージャー（PM）・研究開発プロジェクト一覧
2024/10/18

(五十音順)

ムーンショット目標10「2050年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現」

PM氏名	所属・役職	研究開発プロジェクト名
奥野 広樹	理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 核変換技術研究開発室 室長	革新的加速技術による大強度中性子源と超高温プラズマ維持装置の開発
木須 隆暢	九州大学 超伝導システム科学研究センター センター長	多様な革新的炉概念を実現する超伝導基盤技術
星 健夫	自然科学研究機構 核融合科学研究所 教授	超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム

※研究開発プロジェクト名は、採択後の作り込み（提案した研究開発プロジェクトの見直しおよび具体化）を経て変更される場合があります。

2050年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現



炉工学！

一部は国研や大学の炉工学分野開発研究へ

炉工学！
炉工学！

2025/10/6

プロジェクトマネージャー（PM）

研究開発プロジェクト名

岡田 信二（中部大学 理工学部 教授）

革新的ミュオン触媒フュージョン技術の社会実装

小澤 徹（早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 教授）

核融合研究のパラダイムを刷新する数理モデルの定式化と解決法のイノベーション

齋藤 晴彦（東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）

超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開

田中 秀樹（信州大学 アクア・リジェネレーション機構 教授）

核融合燃料サイクルの実現に向けた革新的同位体分離システムの開発

谷川 博康（量子科学技術研究開発機構 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所 ブランケット研究開発部 次長）

コンパクト核融合炉を実現する自律型先進炉内機器の開発

藤岡 慎介（大阪大学 レーザー科学研究所 高エネルギー密度科学研究部門 教授／Blue Laser Fusionエネルギー協働研究所所長）

空間光蓄積型レーザーフュージョン発電炉

森 芳孝（株式会社EX-Fusion 取締役ファウンダー）

青紫色半導体レーザーによる慣性核融合モジュールの構築

一方、米国DOE核融合イノベーション研究エンジン（FIRE）



FIRE Collaboratives は、DOEのFusion Energy Sciences (FES) プログラムが、研究・産業界・国立研究所を結ぶネットワーク型研究体制として2025年に組織した新しい取り組みである。FIREコラボレーティブは、政府機関、学界、産業界から集まったチームで構成され、商業核融合開発に向けた技術的課題に取り組んでいます。DOEは、FIREコラボレーティブを通じて、科学的発見を商業核融合応用へと加速させることを目指し、6つのプロジェクトが採択された。

● Advanced Profile Prediction for Fusion Pilot Plant Design

- 主導機関：Massachusetts Institute of Technology (MIT)
- 目的：核融合パイロットプラント設計のための高精度プロファイル予測技術開発
- 内容：プラズマ挙動・設計最適化のためのデータ同化・モデル開発を推進。

プラズマ設計最適化のためのデータサイエンス

● Fuel Cycle Fusion Innovation Research Engine (FC-FIRE)

- 主導機関：Savannah River National Laboratory (SRNL)
- 目的：トリチウム含む燃料サイクル技術の体系的研究とプロセス技術の確立
- 内容：トリチウム回収・燃料処理・燃料ハンドリングなど融合燃料サイクルの開発を進める。

トリチウム燃料サイクル

● Accelerating Fusion Blanket Development through Nuclear Testing

- 主導機関：Idaho National Laboratory (INL)
- 目的：核融合ブランケット材料・システムの実験的評価技術を加速する
- 内容：核融合炉の壁材料/ブランケットの核試験・性能評価基盤を構築。

中性子照射評価基盤構築

民間ではできない大学における「中性子照射」材料分野を中心とした炉工学基盤技術を支援！

● Target Injector Nexus for Development Research

- 主導機関：General Atomics（や関連研究組織）
- 目的：慣性融合（IFE）原子核融合に必要なターゲット注入技術の研究
- 内容：レーザー/粒子ビームによる燃料ペレット注入の高効率・高再現性技術の確立。

レーザー核融合の燃料ペレット

● Rapid High-Fidelity Bulk Irradiated Materials Data Generation to Accelerate Solutions for Commercial Fusion Energy Systems

- 主導機関：Massachusetts Institute of Technology (MIT)
- 目的：照射環境下材料データを迅速・高精度で生成するための技術・データ基盤の構築
- 内容：中性子照射や熱ストレス下で必要なデータセットを実験・モデリングで拡充。

ハイスループット照射データ

● Integrated Materials Program to Accelerate Chamber Technologies (IMPACT)

- 主導機関：University of Tennessee - Knoxville
- 目的：核融合炉心チャンバー・ファーストウォール材料の統合的開発
- 内容：材料開発から評価・設計までを統合するプログラムで、商用炉用の高耐久材料ソリューションを目指す。
- 4年間で2,000万ドル。
- テネシー大学、オークリッジ国立研究所、ストーニーブルック大学、ミシガン大学、ノースウェスタン大学、マサチューセッツ工科大学、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、アイダホ国立研究所、マイアミ大学、カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)

構造材料規格の確立

※日本では今回の補正予算ではQST,NIFS,阪大レーザー研への施設整備予算しかついておらず、中性子照射やトリチウムのような大学の特徴的な資源の有効活用ができていない。また、そのためのチャンネルが存在していないのは問題。

- 国内の大学において高線量の中性子照射材（やアクチノイド）を取り扱う唯一無二の大型施設
 - QST, NIFSでは（JAEAですらも縮小）不可能な状況にある放射化試料のハンドリングを含めた人材育成と研究成果に創出に貢献
 - 照射後試験においても他では不可能な微細組織評価、超微小試験などを国際共同利用・共同研究拠点（S評価）の枠組みで実施できる状況にしている。
- しかし、米国ORNLやINL、英国UKAEAにおいて、最新鋭設備を整えたホットラボが整備されており、わが国の優位性は既に失われつつある。
 - 残念ながら大学の大型施設の維持管理を継続的にサポートする仕組みがない。

フュージョンエネルギー実現のクリティカルパス

核融合炉構造材料の重要性

クリティカルパス (Critical Path) :

プロジェクト管理において、開始から終了までで最も時間がかかる最長の作業経路

核融合炉材料の分類

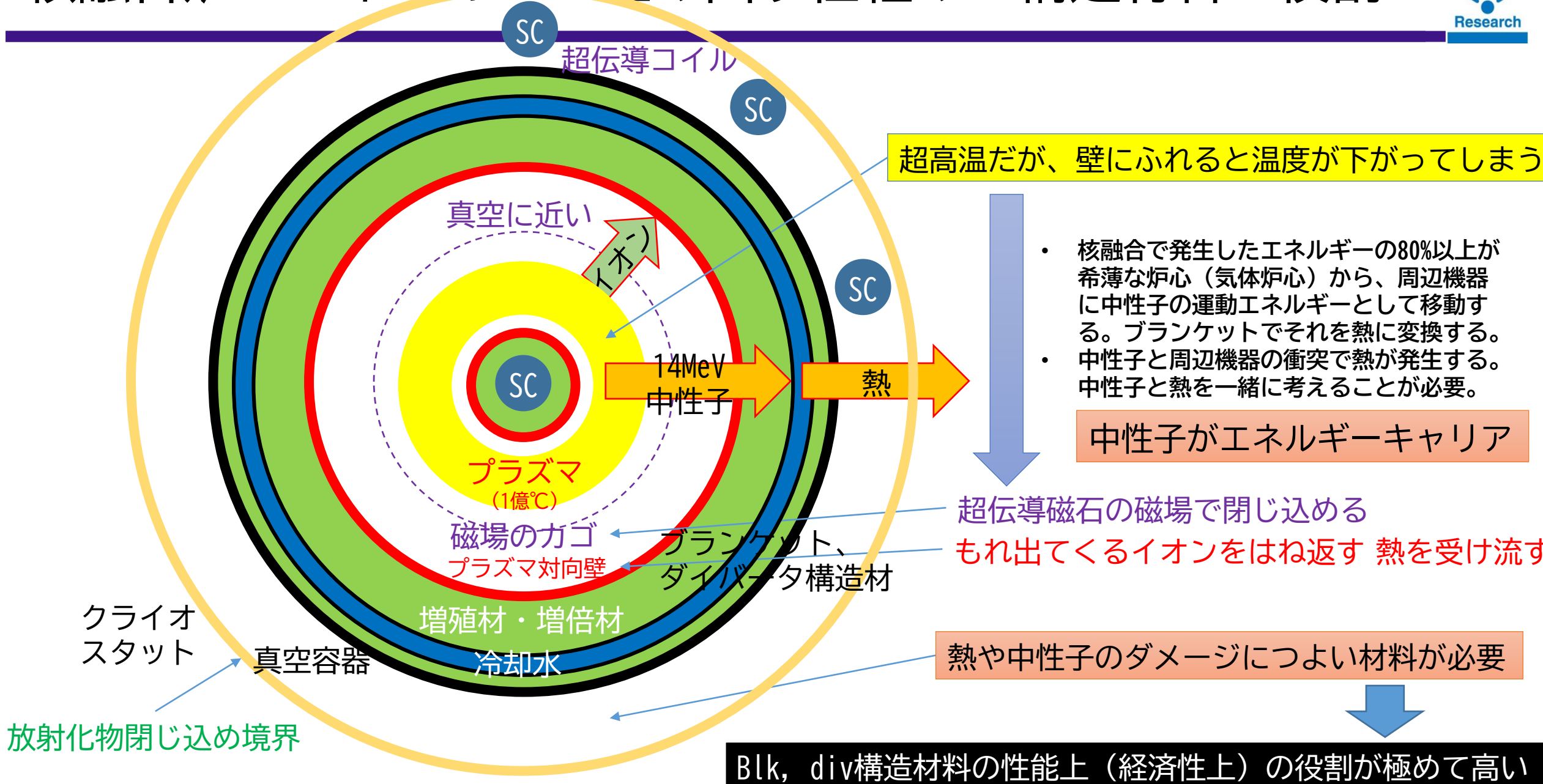


表1 核融合炉材料の機器別分類と想定される照射環境レベル。

	機器	機器構成	機器構成材料の例	照射量※	
				中性子	荷電粒子
核融合材料	超伝導コイル	超伝導磁石	Nb ₃ Sn, Ni ₃ Ti, Bi2212	(低)	-
		絶縁材	ポリイミド, ガラス繊維, 樹脂	(低)	-
		低温構造材	オーステナイト鋼(JJ1)	(低)	-
	光学機器	反射材	多層膜誘電体	高	(低?)
		レンズ	SiO ₂	高	(低?)
	ブランケット	三重水素増殖材料	Li, Li ₂ TiO ₃ , 液体Li-Pb	高	-
		中性子増倍材料	Be, Be ₁₂ Ti等のベリライド	高	-
		プラズマ対向被覆	W材料	高	(中)
		壁・配管構造	低放射化フェライト鋼(F82H), オーステナイト鋼, バナジウム合金, ODS鋼,	高	-
		内部構造(被覆・インサート)	酸化物, 金属ホウ化物, SiC複合材料	高	-
	ダイバータ	アーマ	W材料	高	(高?)
		ヒートシンク	Cu合金, F82H	高	-
	その他	高温部放射線遮蔽材	ホウ化物セラミックス	高?	-
		常温部放射線遮蔽材	ポリエチレン	低?	-
		コンクリート構造	コンクリート(低放射化?)	(低?)	-

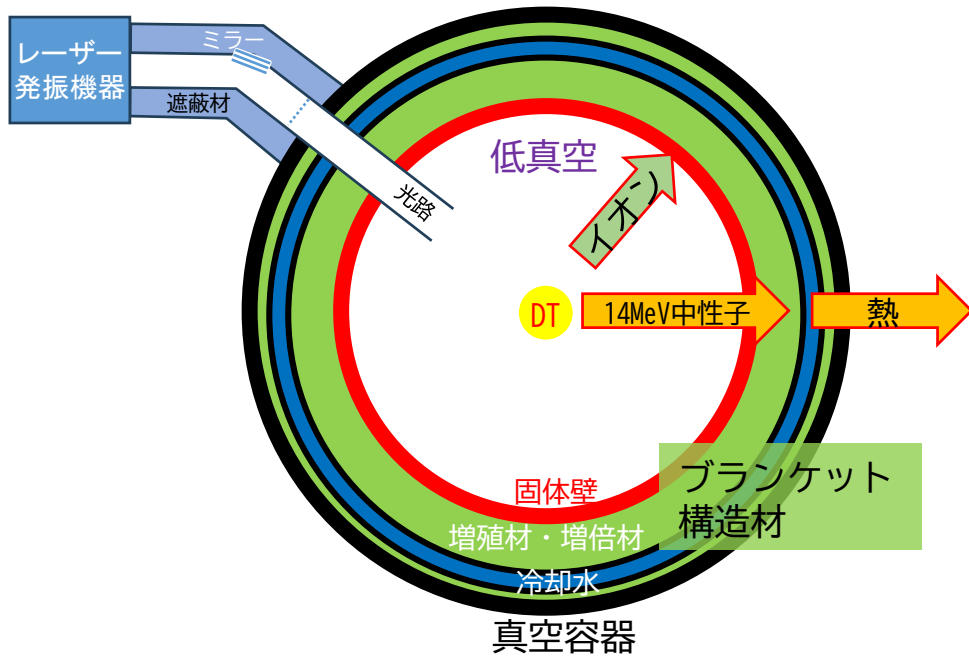
※括弧書きは主機能保持のために本来照射を避けるべき材料

核融合炉でエネルギーを生み出す仕組みと構造材料の役割



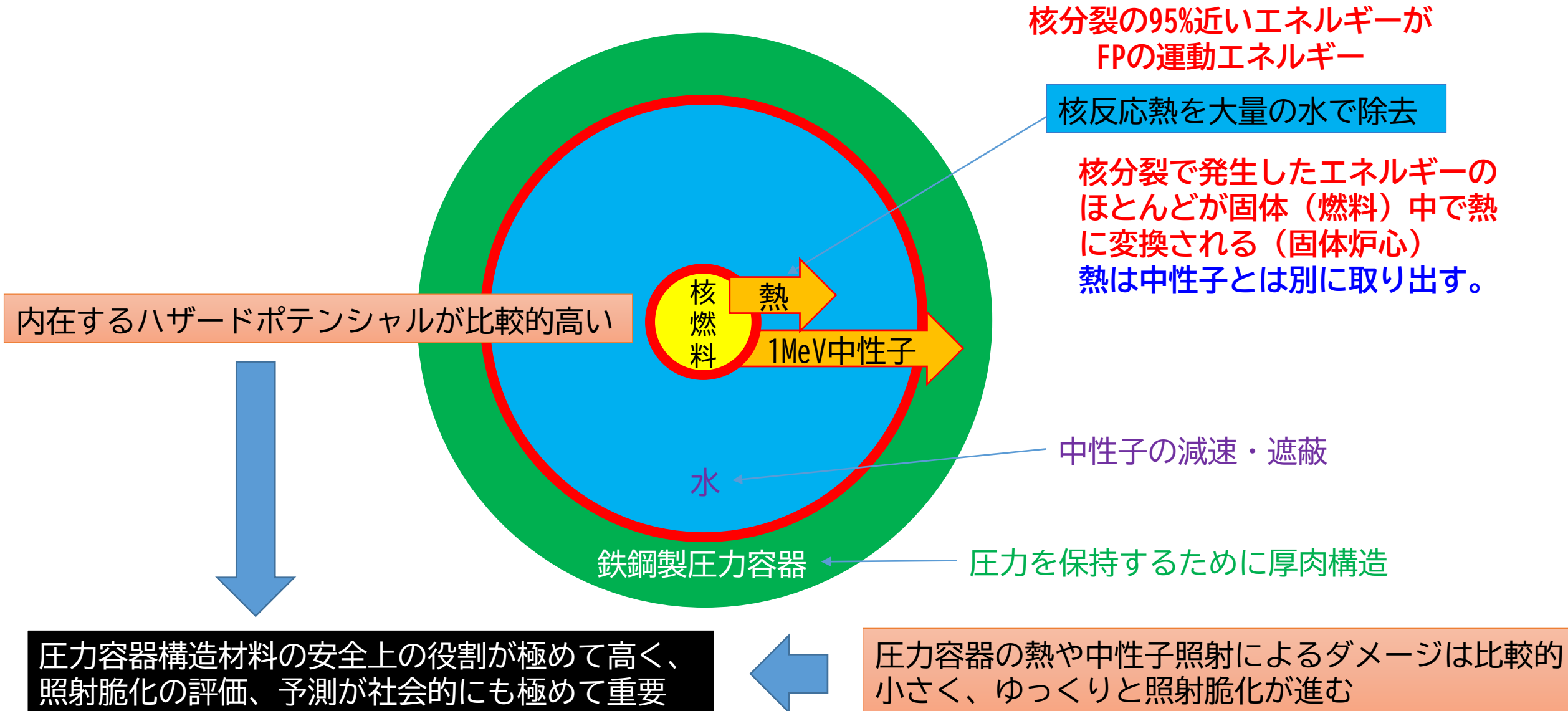
レーザー核融合炉の場合

(c) レーザー核融合炉 (固体壁)



最終光学系に負荷が集約

軽水炉でエネルギーを生み出す仕組みと構造材料の役割



核融合炉構造材料に求められる機能・特性



1. 構造健全性

- 外力（熱応力、電磁力も！）
- 耐照射性：原子炉圧力容器の100倍以上の照射量
- 耐高温・環境特性（耐食性）

2. 中性子を適度に吸収しがたいこと（TBR確保のため）

- 薄肉構造：高強度材が必要 トリチウム増殖比

3. トリチウムをため込まないこと。

- でも、スカスカ通さないこと。

4. プラズマに悪影響を及ぼさないこと。

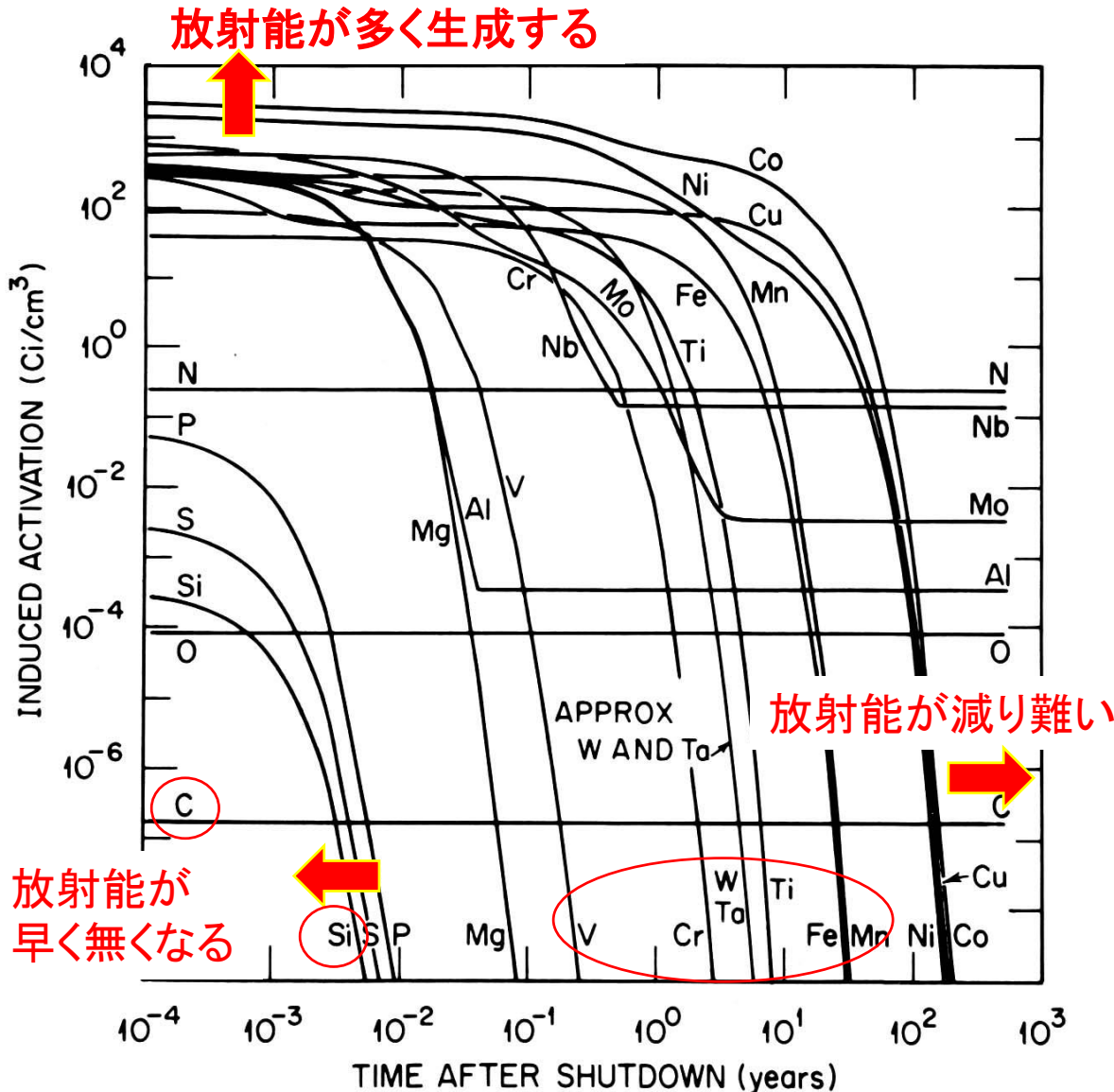
- プラズマ側には被覆必須！

5. なるべく低放射化であること。

材料の放射化を少なくする方法・低放射しにくい元素を選ぶ



Wiffen, Proc. Top. Conf. Ferritic Alloys p195 (1983) Snowbird, USA



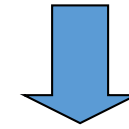
●核融合炉では、環境負荷を低減するために放射性廃棄物低減する必要がある。

●誘導放射能の少ない元素を材料として使う。

半減期の短い元素

生成量の少ない元素

●C, Fe, Ti, Cr, V, Siなどの元素で構成される材料の開発



* Fe-Crを中心とした
低放射化フェライト鋼

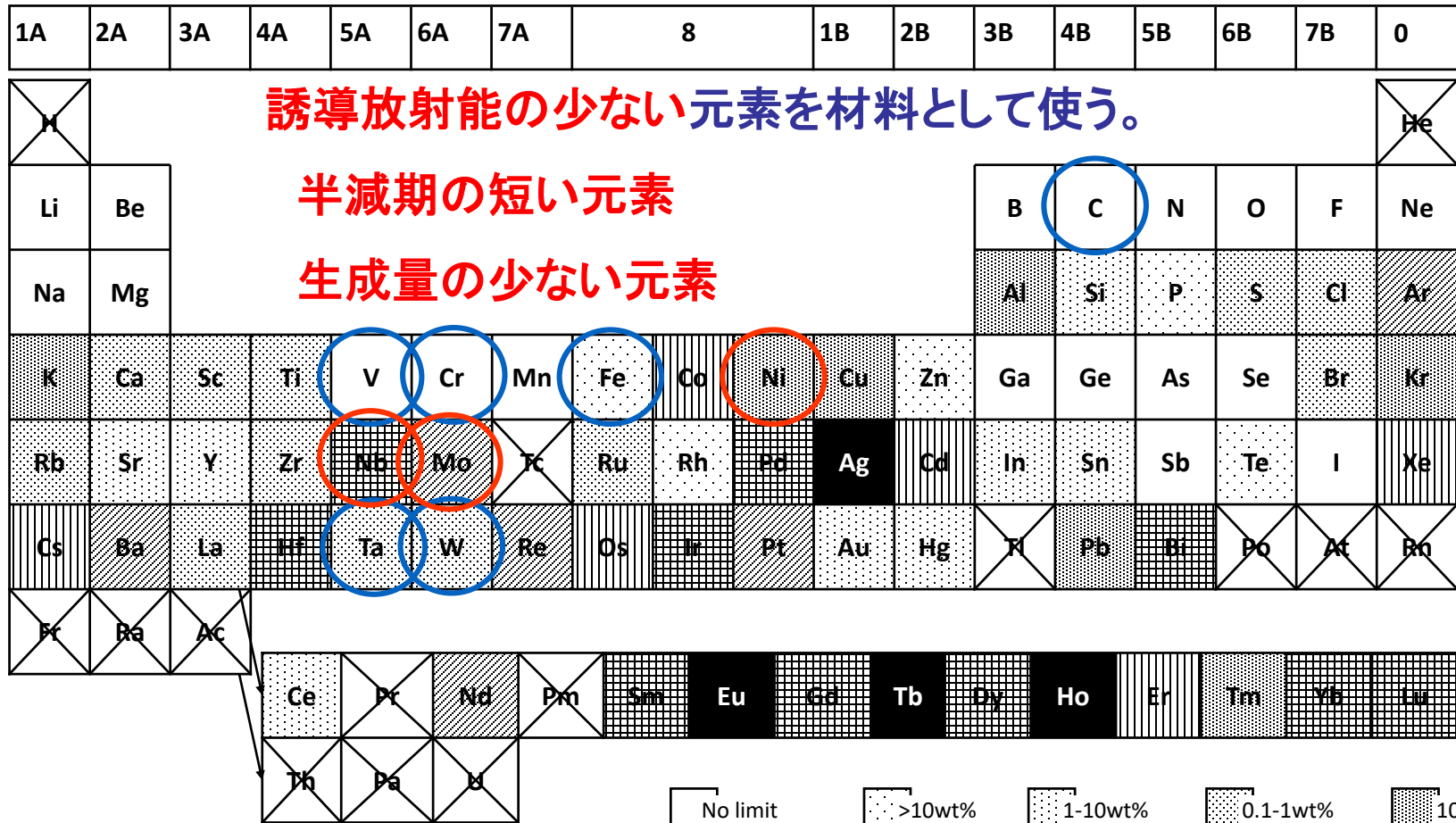
ODS鋼

* バナジウム合金

* SiC複合材料

核融合中性子を3年間連続で照射(9MW-y/m²)し、炉を止めた後の放射能濃度の時間変化 (10²⁷n/m²:100dpa, Fe)

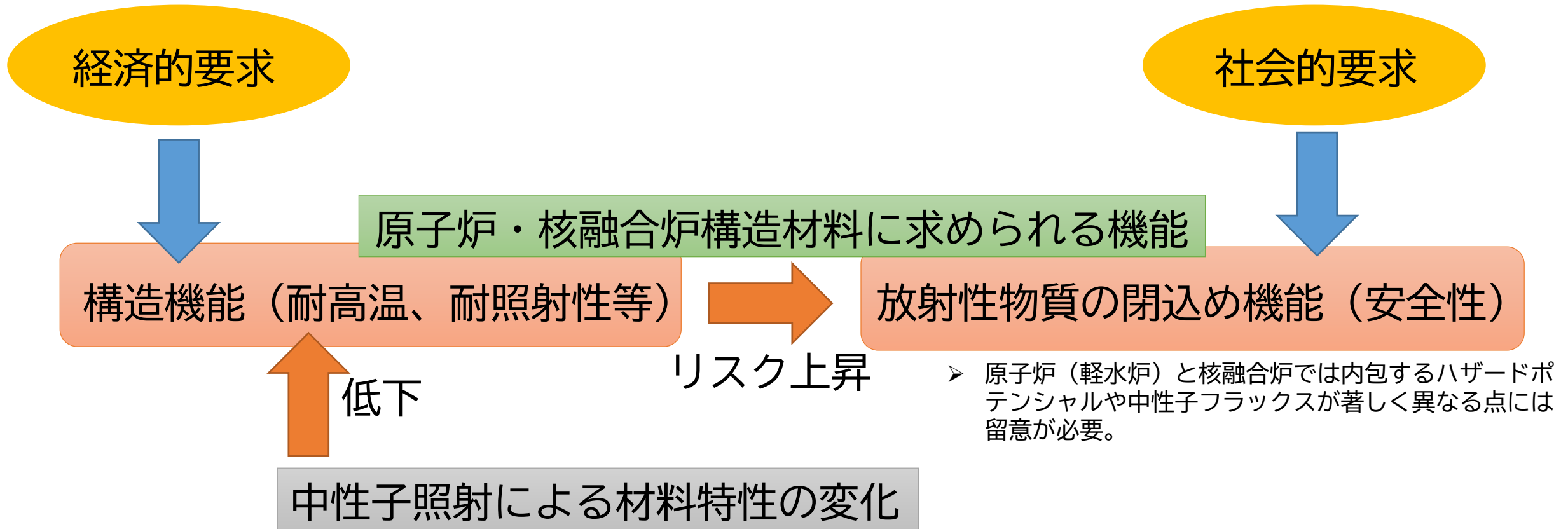
低放射化元素



Hands-onによる再利用を可能とする観点から計算した、原型炉第一壁材料における各元素の許容濃度(中性子フルエンス 12.5MWy/m², 冷却期間100年後)

低放射化を優先すると、構造材料に使える元素の選択肢はそれほど多くはない

なぜ核融合炉材料の照射研究が必要なのか？



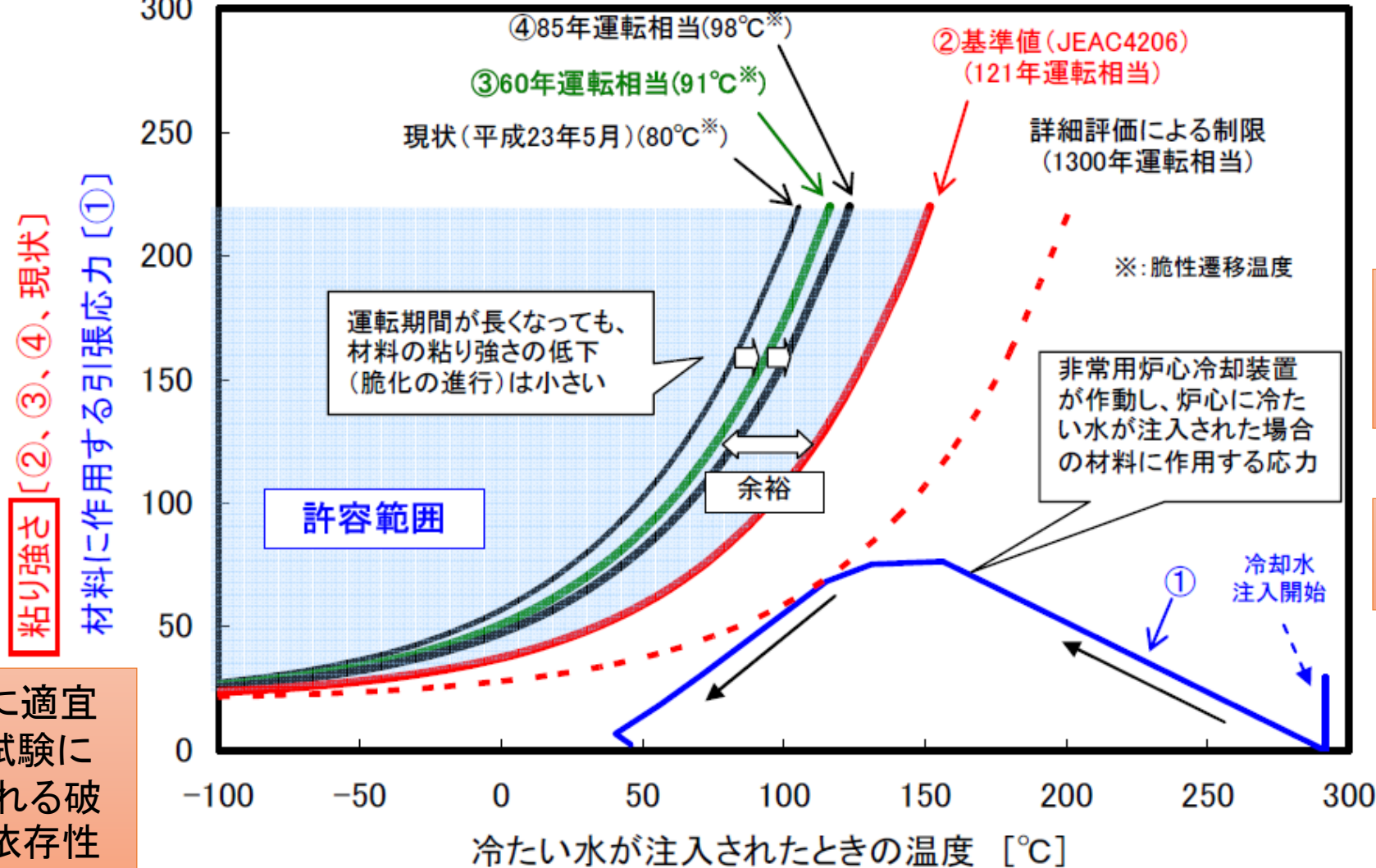
照射データの不確かさの要因

- 核融合炉中性子照射データがほぼ存在しない
- 異なる照射場間の相関が未解明
- 従来の照射場ではデータ数を増やすことが困難

照射データの不確かさの増大は、核融合炉のリスク上昇（受容性低下）に繋がる。

原子炉压力容器照射脆化と裕度の考え方

[MPa \sqrt{m}] Ref. 九州電力「玄海原子力発電所1号機原子炉容器の照射脆化に対する健全性について」

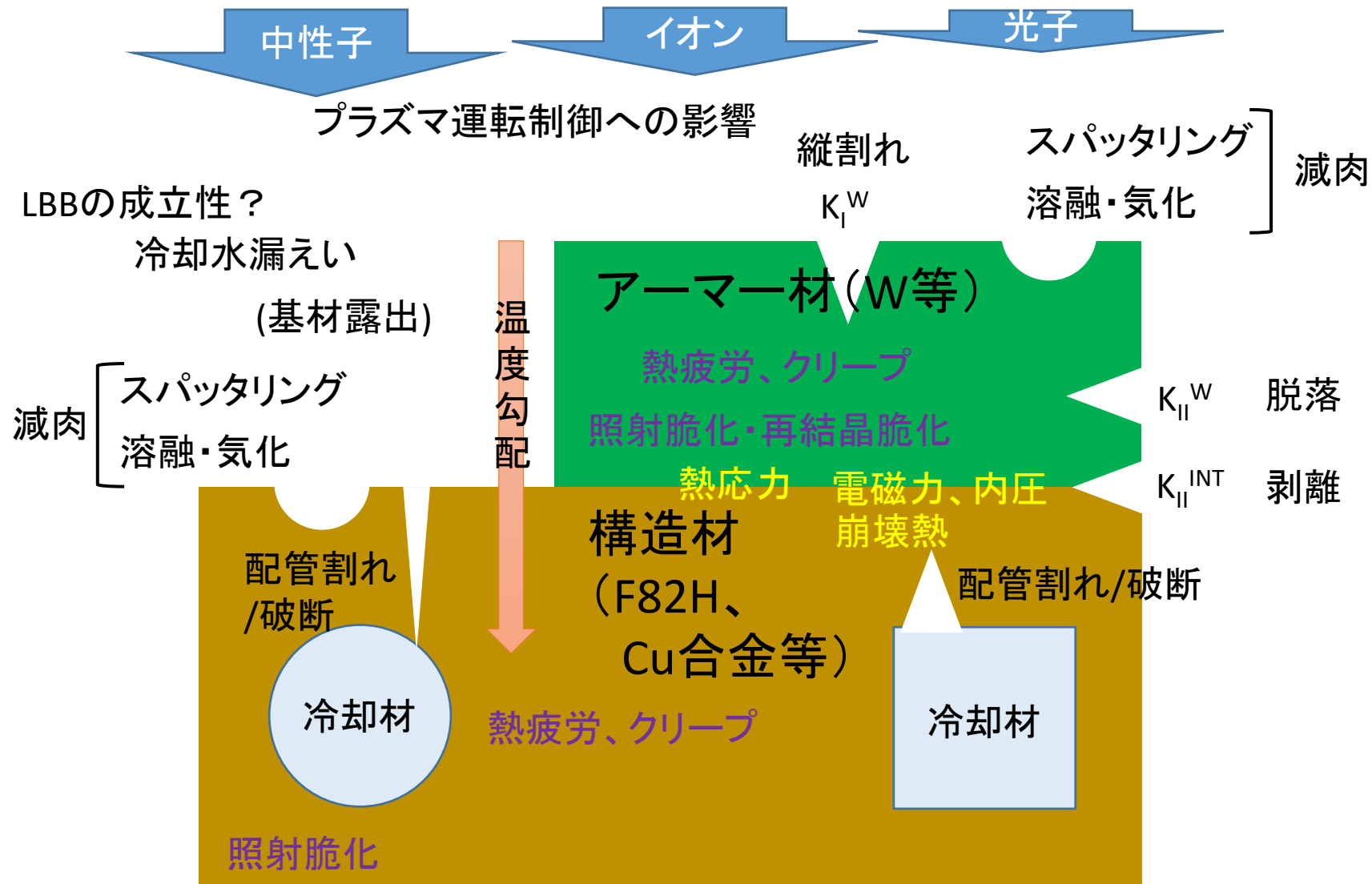


検査によって発見され
ない最大の仮想き裂
の設定

想定される荷重負荷
条件の設定

定期検査の際に適宜
行われる監視試験に
よって見積られる破
壊靱性の温度依存性

複雑なプラズマ対向壁構造の構造健全性を如何に保証するかが大きな課題



複雑な構造物の様々な破壊様式を想定した高エネルギー粒子線（中性子、イオン）の照射影響評価が必要

核融合炉構造材料の外力負荷時に想定されるひずみ速度



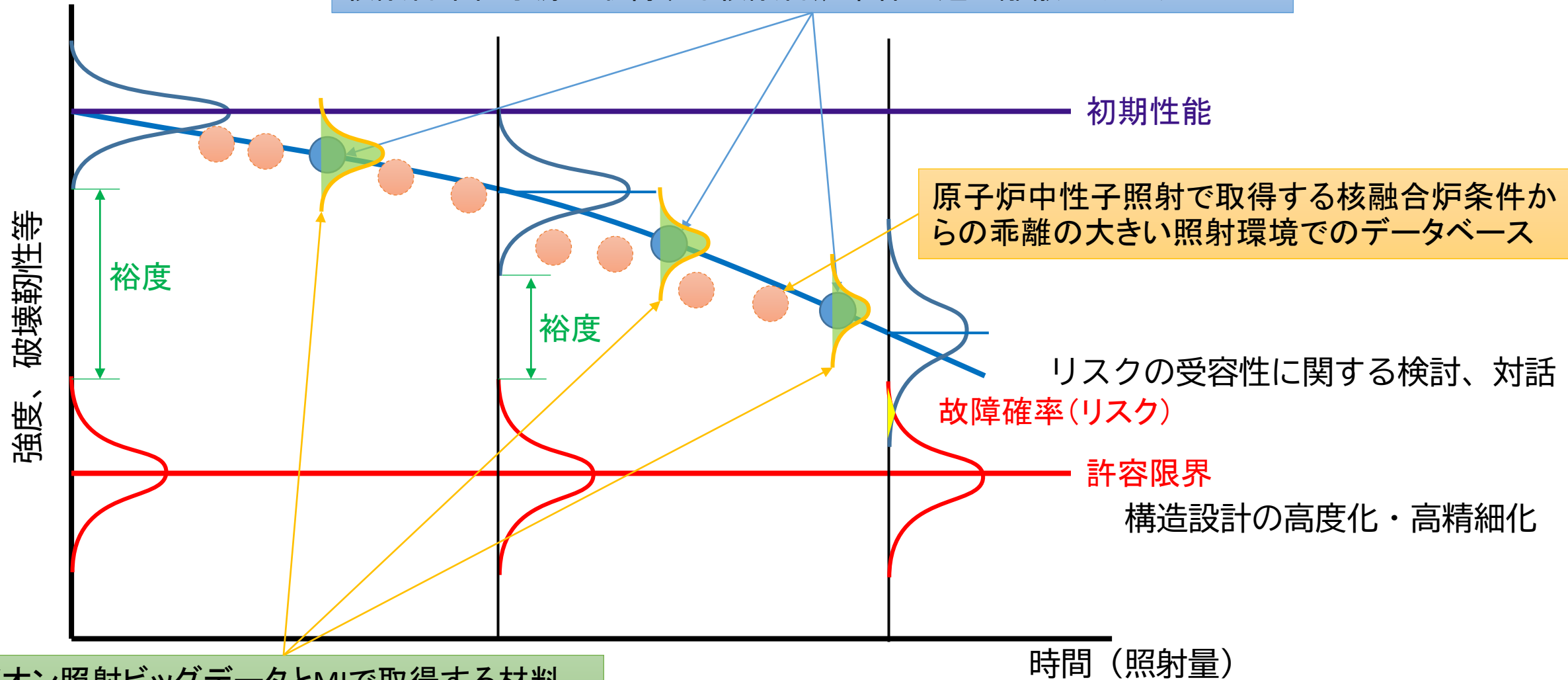
ひずみ速度 (s ⁻¹)	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁰	10 ³	10 ⁶
	クリープ		準定常	中間ひずみ速度	棒衝撃	高速プレート衝撃
一般的な試験荷重負荷方法	定荷重(応力)試験機		油圧式 or スクリュー式試験機	空圧式 or 機械式試験機	機械 or 爆発衝撃	ライトガスガン or 爆発駆動プレート衝撃
考慮すべき動的現象	ひずみ vs. 時間 or クリープ速度		定ひずみ速度試験	試験片と試験機中の機械的共鳴	弾塑性波伝播	衝撃波伝播
	← 等温過程			断熱過程 →		
一般的現象	自動車事故					
	地震					
核融合炉に想定される現象	プラズマ電流 ディスラプション				レーザー核融合炉固体壁	

Based on U.S. Lindholm, "High strain rate test", Measurement of mechanical properties, Vol. 5, Techniques of Metals Research, Wiley Interscience (1971)

構造機能の寿命に対する確率論的アプローチと照射場の役割



核融合中性子源で取得する核融合炉条件に近い離散的データベース



イオン照射ビッグデータとMIで取得する材料強度の統計的性質を含めた照射データベース

時間 (照射量)

リスクの受容性に関する検討、対話
故障確率(リスク)

許容限界

構造設計の高度化・高精細化

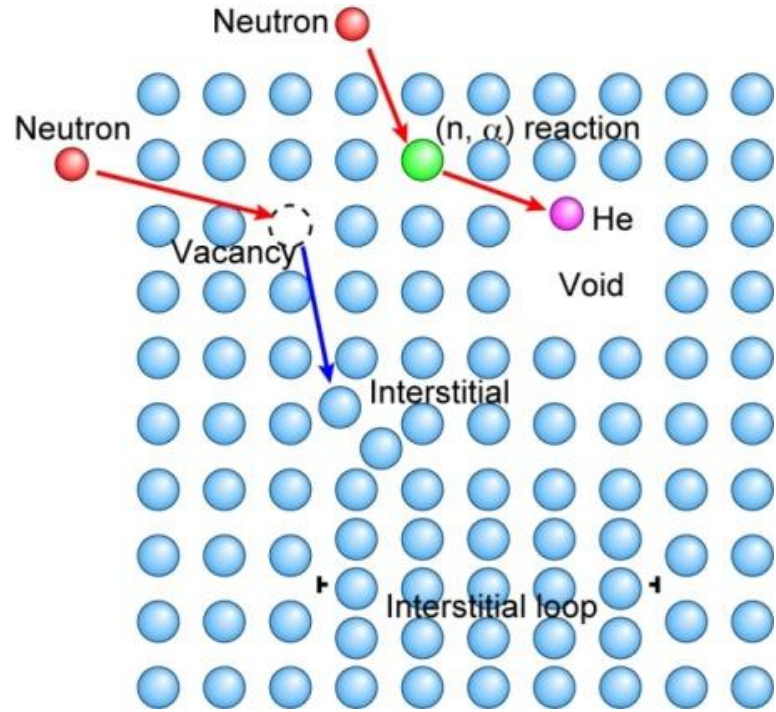
核融合炉の耐照射性材料の性能保証の考え方



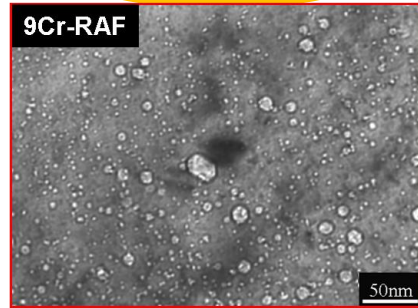
- 高いハザードポテンシャルの内包物の閉じ込め境界となる軽水炉圧力容器に用いられる低合金鋼のように、法律で定められるほどの耐照射性（安全性）保持をブランケット構造材やダイバータ構造材に求めることは合理的ではない。
 - どの程度の性能保証が必要なのかは、事業者が受容可能な経済性に依存（すべき）⇒もちろん安全性に関する社会との対話を踏まえた上で
 - ちなみに現在の日本のPWR燃料破損率（リーク発生頻度）は 10^{-5} （10万本に1本）以下のオーダー（ATOMICA）
 - https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-07-02-16.html
 - 確率論的破壊力学（PFM）に基づく軽水炉圧力容器の破損頻度の検討例は 10^{-9} /炉年のオーダーとなっている。
- 照射劣化（等）による構造材料の破損頻度の許容可能なクライテリアに応じて、照射劣化の知見の不確かさの許容範囲は変わり得る。
 - データベースの拡充は永遠の課題であるが、構造材料の性能保証要件は社会・経済受容性と合わせて合理的に判断されるべきであるし、フュージョンエネルギーの早期実現にはこのようなリスク管理の考え方を社会と共有することが必須であると考えられる。

高エネルギー粒子線照射による（金属）材料の劣化

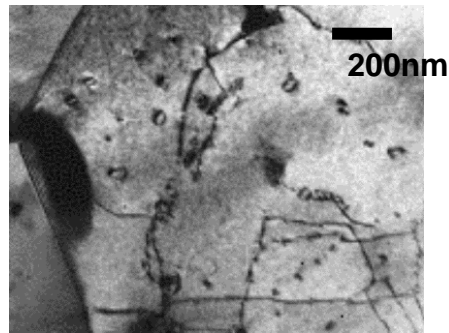
照射損傷



微細組織変化



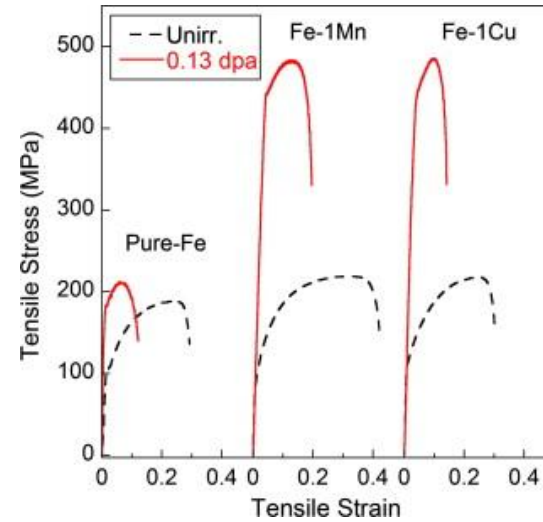
ボイド(空孔)



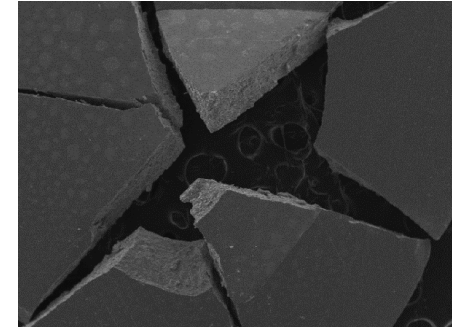
転位ループ

照射欠陥の集合・離散
: 拡散過程(照射誘起・促進現象)

強度・破壊特性の劣化



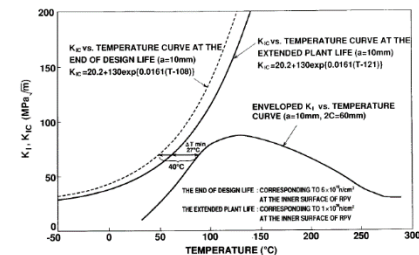
照射硬化・延性低下



照射脆化

自己格子間原子、空孔、核変換原子
(およびそれらの集合体・複合体)の
非熱的な導入

構造健全性
への影響



結局、どんな材料が必要なのか？

● プラズマ科学研究者の言い分

- プラズマ閉じ込めの邪魔をしない（スパッタリングしない）材料を用意してください。
 - 材料研究者の回答：スパッタリング収率は物性で決まるので現状以上のものを作るのは不可能です。プラズマが材料に影響を与えないようにきちんと閉じ込めてください。ただし、熱応力で割れにくいタングステン材料は開発します（限界は高くないですが）。
- 中性子のことは（プラズマに関係無いので）よくわからないけど、材料が耐えられないってエライ先生も言ってたよ。
 - 材料研究者の回答：耐える or 耐えないの二元論ではないです。経年で劣化していく材料を受け入れ可能かどうかは、まさに工学課題です。工学とはリスクに向き合う科学とも言えます。

● 核融合炉材料工学研究者の言い分

- 中性子による劣化以前の問題として、トリチウム燃料サイクルや構造健全性を成立させようとするすると構造材料にそれほど工夫の余地が残っているわけでもなく、ひたすらリスクを減らすための（照射）データ取得と材料のFineチューニングが必要ですよ。
- もちろん高温強度や耐照射性に優れた革新的構造材料も期待できるけど、これから全く新しいものが出てくる余地は少ないですよ。既に種がまかれているバナジウム合金、ODS合金、SiC複合材料、ハイエントロピー合金等の検証を行うことが大切ですよ。
- でもこれらは科学としては極めて地道になりがちなので、日本の科研費は付きにくいんです。諸外国では通るような提案も通りません。ただし本気で核融合炉を作る気があるのならば、ここに投資すべき。早期回収が必要な民間資金にはそぐわない。このような分野に他国は本気で国の資金を投じている。日本では？

日本の核融合炉工学の分野で最も投資が不足している 核融合炉構造材料の多くは別予算で頑張ってきた

- 核融合関連予算で開発が進められたもの
 - 低放射化フェライト鋼F82H (JAERI→JAEA→QST)
 - バナジウム合金 (NIFS)
 - タングステン材料 (科研費、ITER補助金等)
- 核融合以外の予算で開発が進められたもの
 - 酸化物分散強化フェライト鋼 (原子力)
 - SiC/SiC複合材料 (JST、原子力)
 - 炭素材料 (原子力等)



唯一の核融合材料予算



中性子照射 (日米科学技術協力事業核融合分野および東北大金研大洗共同利用)



現在開発が進められている核融合炉構造材料の殆どが日本の研究者によって世界トップレベルに！



原子力の元気がないと、核融合炉構造材料の研究が進展しにくい構造になってしまった

格子欠陥物理に関わる照射損傷研究についても世界的な成果が得られてきた

いずれにしても利用可能な照射場の減少はコミュニティに大きなダメージを与えている

研究テーマがプラズマに関わるタングステン材料に集中し、研究テーマの多様性が減少するとともに、コアとなる中性子照射影響の研究が停滞

Ranking as a researcher in the field of Nuclear Material



RAF, HEA

From ScholarGPS™ 2024

#14 Akira Kohyama, Muroran Institute of Technology, Japan **RAF, SiC**

#16 Naoaki Yoshida, Kyushu University, Japan **PSI**

#20 Takeo Muroga, National Institute for Fusion Science, Japan **核融合材料**

#22 Tetsuo Tanabe, Osaka Metropolitan University, Japan **トリチウム**

#27 Akihiko Kimura, Kyoto University, Japan **RAF, ODS**

#30 Shigeharu Ukai, Hokkaido University, Japan **ODS**

#34 Michio Kiritani, Hiroshima Institute of Technology, Japan **照射損傷**

#59 Hideki Matsui, Tohoku University, Japan **V, 照射損傷**

#79 Shiro Jitsukawa, National Institute of Technology, Fukushima College, Japan **RAF**

#89 Somei Ohnuki, University of Science and Technology Beijing, China **照射損傷**

#104 Naoyuki Hashimoto, Hokkaido University, Japan

#106 Hideo Kayano, Tohoku University, Japan **RAF**

#109 Shiori Ishino, University of Tokyo, Japan **照射損傷**

#113 Tatsuo Shikama, Hachinohe Institute of Technology, Japan **機能性セラミックス**

#120 Hiroyasu Tanigawa, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Japan **RAF**

#122 Ryuta Kasada, Tohoku University, **USTT, RAF, ODS**

#123 Koreyuki Shiba, Japan Atomic Energy Agency, Japan **Fuel**

#124 Takashi Nozawa, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Japan **SiC, RAF**

#126 Chiken Kinoshita, Kyushu University, Japan **照射損傷**

#139 Tatsuya Hinoki, Kyoto University, Japan **SiC**

#146 Kenji Okuno, Shizuoka University, Japan **トリチウム**

TOP150に20人以上の日本人研究者

核融合炉構造材料研究開発の現状のまとめ

- 既に候補材料は存在している。より先進的な材料の提案と基礎研究もある。
- 研究用原子炉の停止による中性子照射場の不足、照射研究用イオン加速器施設ですら停止により、照射データベースの構築は年々困難になっている。
 - 照射用海外原子炉利用予算も削減が続く。
 - 中性子照射後試験施設の老朽化。
 - もちろん核融合中性子照射データもない。
 - 詳細はプラズマ・核融合学会誌100号参照
- すなわち候補材料はあるが、自信をもって経済的に（安全に）使用できるといふ確証を得るための根拠となる照射データが十分ではない。
 - フュージョンエネルギー実現の**クリティカルパス**になり得る
- 照射データはスタートアップを含む民間には手が出しにくい領域である。

クリティカルパス (Critical Path) :

プロジェクト管理において、開始から終了までで最も時間がかかる最長の作業経路



核融合炉設計概論



初級編

核融合炉工学とは？

核融合炉を実現するための学術体系



基本的には（ほぼ）核融合炉でしか求められない分野を中心としつつも（何れからも逃れられない）総合工学である

- プラズマ科学と核融合炉工学と社会科学等の他分野を橋渡しする工学分野
 - ニーズとシーズを繋げ、フュージョンエネルギーの実現性を見積もる分野とも言える。
- 概念設計段階において活用する集大成のひとつが「システムコード」
 - プラズマ物理の成果を炉工学の文脈に落とし込み、社会受容性への適用性について検証することを可能に。

システムコードの概要

- 核融合炉の概念設計では「システムコード」を用いて整合性のあるパラメータの設定を探索して評価する。
- システムコードでは、核融合プラントの各コンポーネントの設計諸元を抽出し簡素化し、プラント全体で矛盾がないようにモデル化を進める。
- さらにコンポーネントの素材と物量からコストの概算評価することも可能である。

システムコードFUSACの流れ



● (a) 目標発電容量 P_{e0} の設定

- ▶ プラントの目標送電端発電容量を設定すると同時に、アスペクト比 A (=大半径 R /小半径 a)、プラズマ小半径の初期値 a 、および炉心プラズマ温度 T 、ブランケットのエネルギー増倍率 M などの基本入力パラメータを与える。小半径 a の最終的な値は、後に述べるように繰り返し計算により求める。

● (b) 炉心プラズマパラメータの計算

- ▶ (a)で与えられたパラメータから、プラズマ大半径 R 、核融合出力 P_F 、必要電流駆動パワー P_{CD} 、プラズマ電流 I_p などの計算を行う。

● (c) プラントパワーフローの計算

- ▶ (b)の計算結果に基づき、送電端電気出力 P_e を計算する。核融合出力 P_F (=中性子出力 P_N + α 粒子出力 P_α)、及び熱出力 P_{th} 、発電端電気出力 P_{eg} を計算する。また、必要電流駆動パワー P_{CD} の計算結果から、必要電流駆動電力 P_{CDe} 、その他所内電力 P_{OS} を計算する。

● (d) 目標発電容量 P_{e0} と送電端電気出力 P_e との比較

- ▶ (c)で求めた送電端電気出力 P_e と、最初に設定した目標発電容量 P_{e0} を比較し、両者が等しくない場合には、他のパラメータを固定してプラズマ小半径 a を変化させ、両者が等しくなるまで(b)~(d)の計算を繰り返す。

● (e) コイル基本パラメータの計算

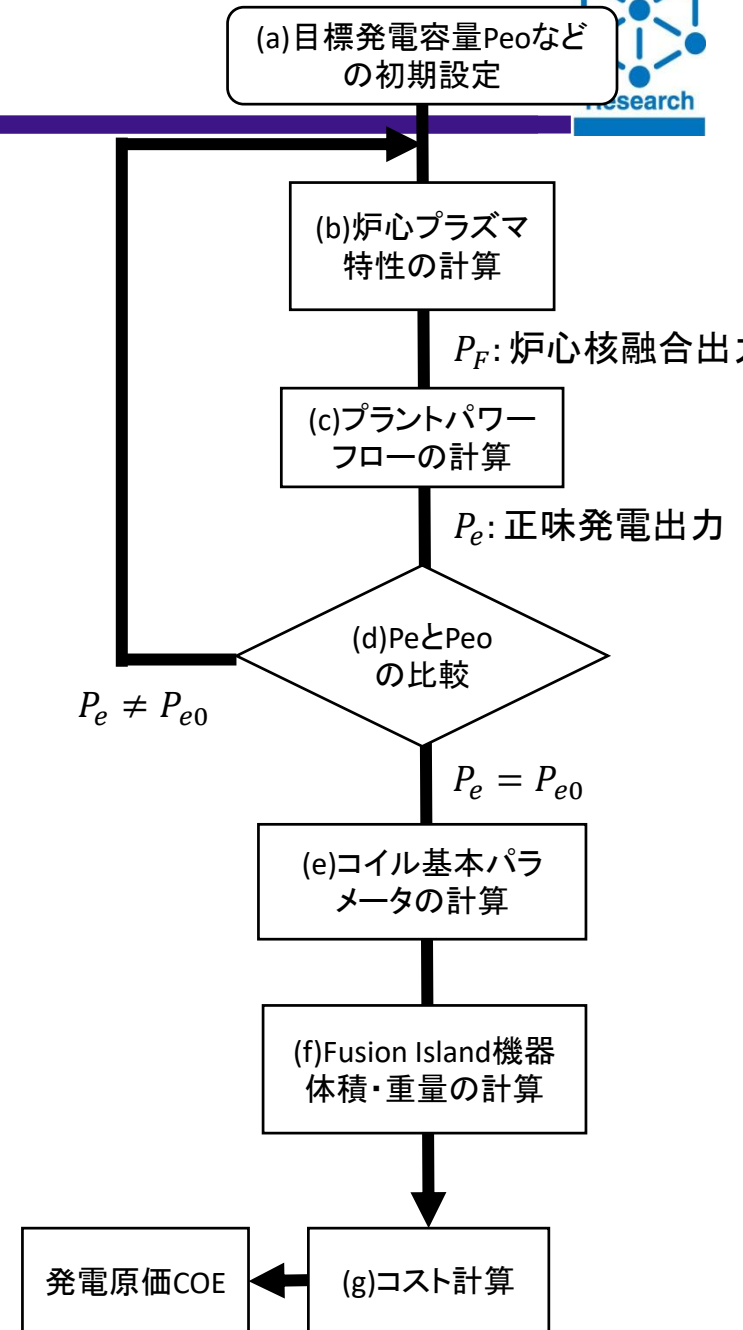
- ▶ 必要コイル起磁力、コイル断面積などを計算し、(a)~(d)で求めたプラズマサイズなどと併せてコイルの体積・重量を計算する。

● (f) Fusion Island機器体積・重量の計算

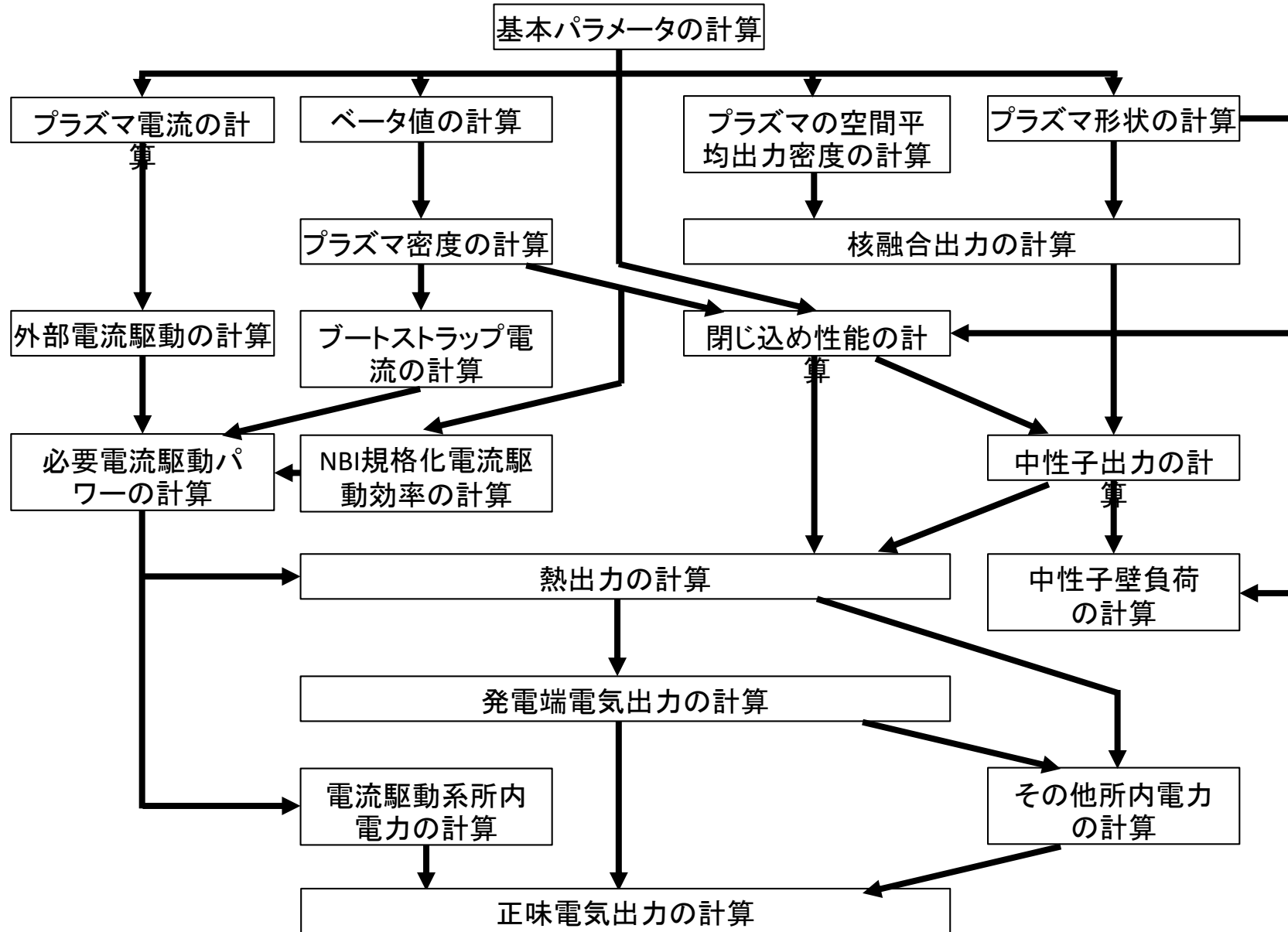
- ▶ (a)~(d)で求めたプラズマサイズなどから第一壁/ブランケット、遮蔽体、主要構造物、ダイバータ板など、Fusion Islandの体積・重量を計算する。

● (g) コスト計算

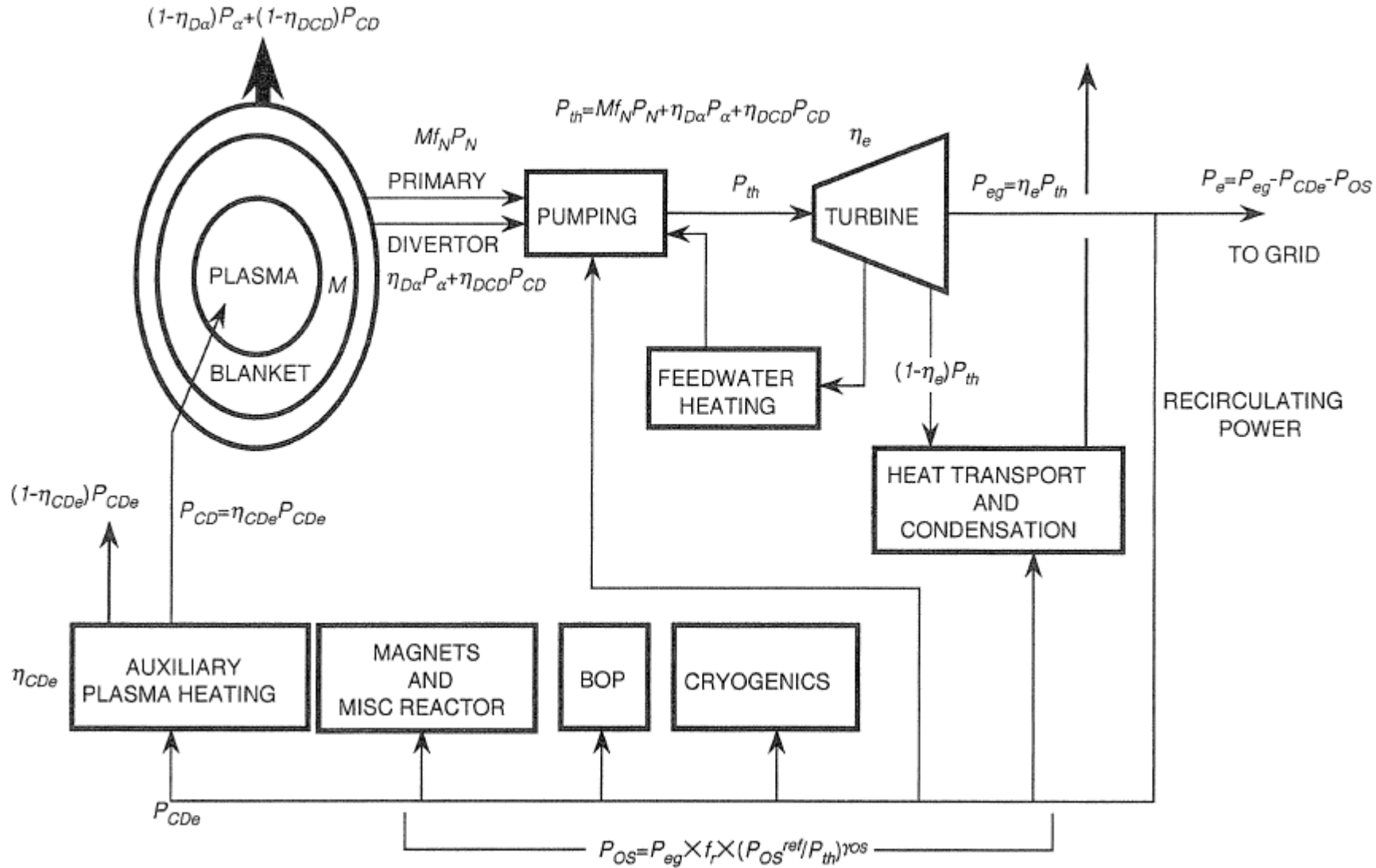
- ▶ 建設費、運転維持費、定期交換費、燃料費などを計算し、これらに基づいて発電原価を計算する。



炉心プラズマ特性・電気出力計算の流れ



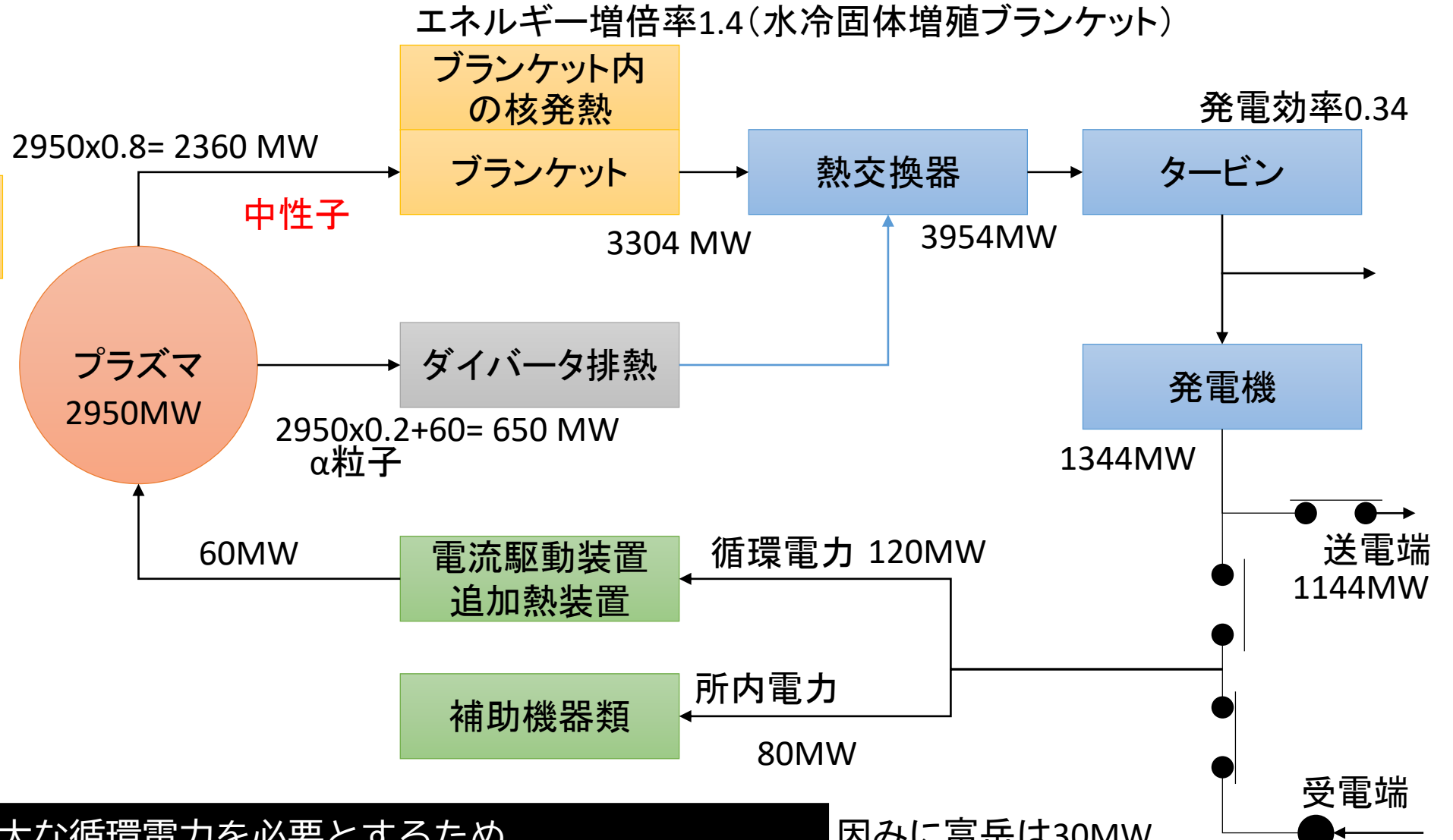
プラントパワーフローモデル



SlimCSでの設計例

核融合エネルギー生産の大半は中性子が担う

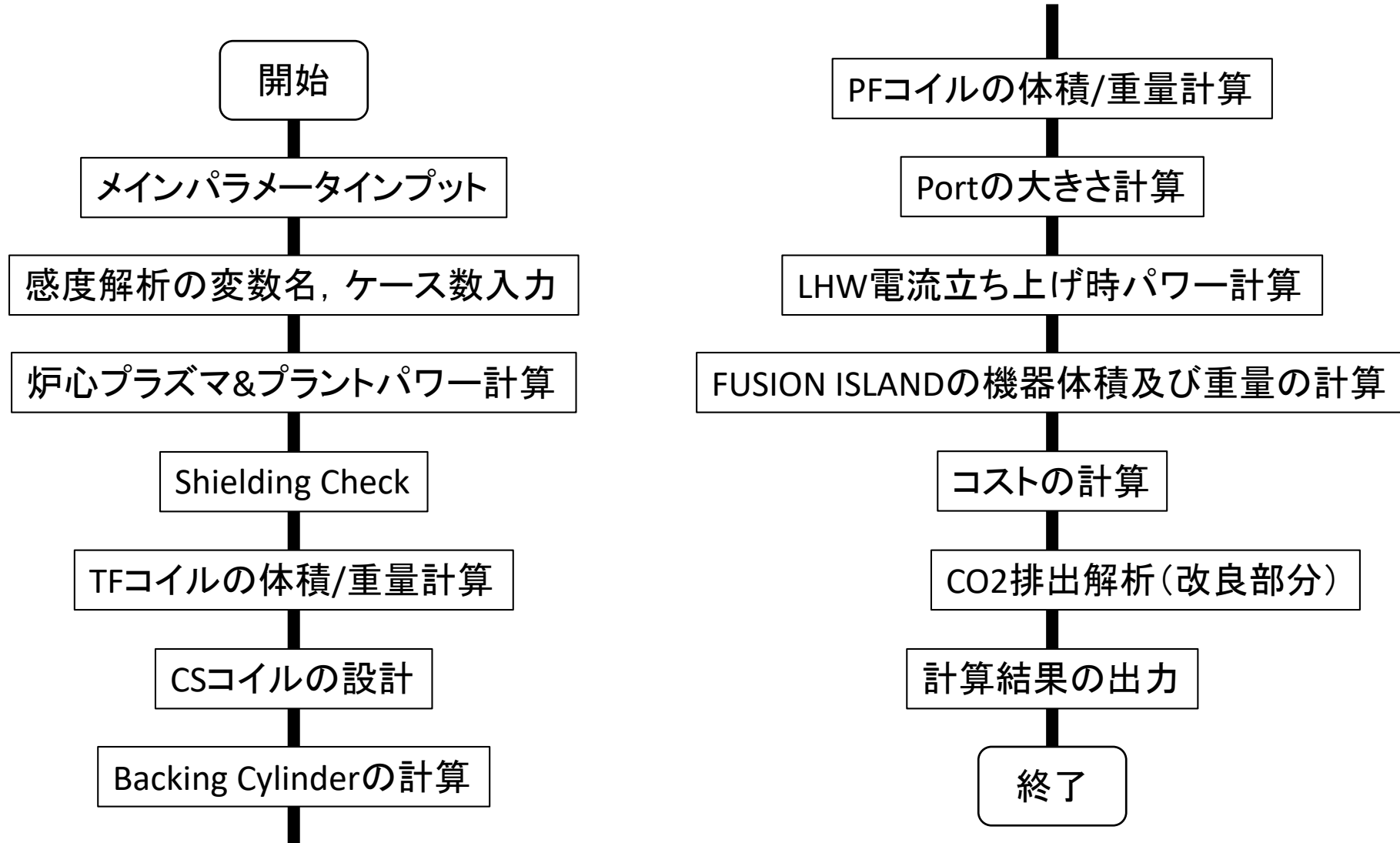
効率増加のためにはダイバータ排熱利用も必要だが...



核融合プラズマ装置は莫大な循環電力を必要とするため、核融合エネルギー生産無しで動かし続ける予算を得ることは容易ではない

因みに富岳は30MW (年間数10億円の電気代)

計算の流れ



パラメーター群



DATA1, DATA2から初期値を入力

DATA1

1. プラズマ小半径の初期値.APINT .M .1.85.
2. 目標プラント発電容量.PEO .MW. 0.
3. 炉心プラズマ温度.TPLZM .KEV .12.5.
4. プラズマ密度の空間分布.ALPHN ..0.10.
5. プラズマ温度の空間分布.ALPHN ..1.00.
6. アスペクト比.ASPEK .. 3.432.
7. 楕円度.PLZMK ..1.85.
8. 3角度.PLZMD ..0.40.
9. MHD安全係数.QPHI..4.81.
10. トロロン係数.GBLK..2.95.
11. 実効電荷.ZEFF..0.00.
12. NBI駆動ビーム種Ab.AB.. 2.0.
13. NBI駆動ビーム種Zb.ZB.. 1.0.
14. ビームエネルギー.EB.MEV . 1.0.
15. 入射位置の接線大半径Rtang .RTNR.. 1.0.
16. 内側ブランケット厚さ .DELB1 .M .0.9000.
17. 内側BLK-遮蔽体空間ギャップ .DELG1 .M .0.0000.
18. 内側遮蔽体厚さ.DELS1 .M .0.9400.
19. 外側ブランケット厚さ .DELB2 .M .0.9000.
20. 外側BLK-遮蔽体空間ギャップ .DELG2 .M .0.0000.
21. 外側遮蔽体厚さ.DELS2 .M .0.9900.
24. 中性子エネルギー増倍率.POWERM..1.18.
25. ブランケットカバー率.FNN .. 0.9.
26. α 粒子パワーの回収効率.ETADA .. 0.7.
27. 外部電流駆動パワーの回収効率 .ETADD .. 0.7.
28. タービン熱電気変換効率.ETAE. .30.0.
29. NBI電流駆動システム総合効率.ETACDE. .50.0.
30. 所内電力scaling則対基準熱出力 .POSB.MW.4150.0.
31. 所内電力scaling則の係数 .FROS. . 6.0.
32. 所内電力scaling則のべき乗指数 .GAMOS .. 0.2.
33. 断面形状のパラメータ.RAMDA .. 1.0.
34. ベータ値限界に対するファクター.CBETA ..1.00.
35. 粒子の電子密度に対する割合.FD.. 0.396.
36. 粒子の電子密度に対する割合.FT.. 0.396.
37. 粒子の電子密度に対する割合.FALP.. 0.041.
38. 粒子の電子密度に対する割合.FO.. 0.000.
39. 粒子の電子密度に対する割合.FC.. 0.000.
40. 粒子の電子密度に対する割合.FH.. 0.0.
41. 粒子の電子密度に対する割合.FB..0.02.
42. 粒子の電子密度に対する割合.FAR ..0.0026.
43. 壁半径のプラズマ係数 .CAW ..1.0629.
44. コイルデューワー厚さ .DELD.M . 0.0.
45. ブートストラップ電流の係数.CBS ..0.65.
46. 第一壁での反射係数 .RSYN.. 0.5.
47. 必要電流駆動xの係数.BBD .. 1.0.

パラメーター群

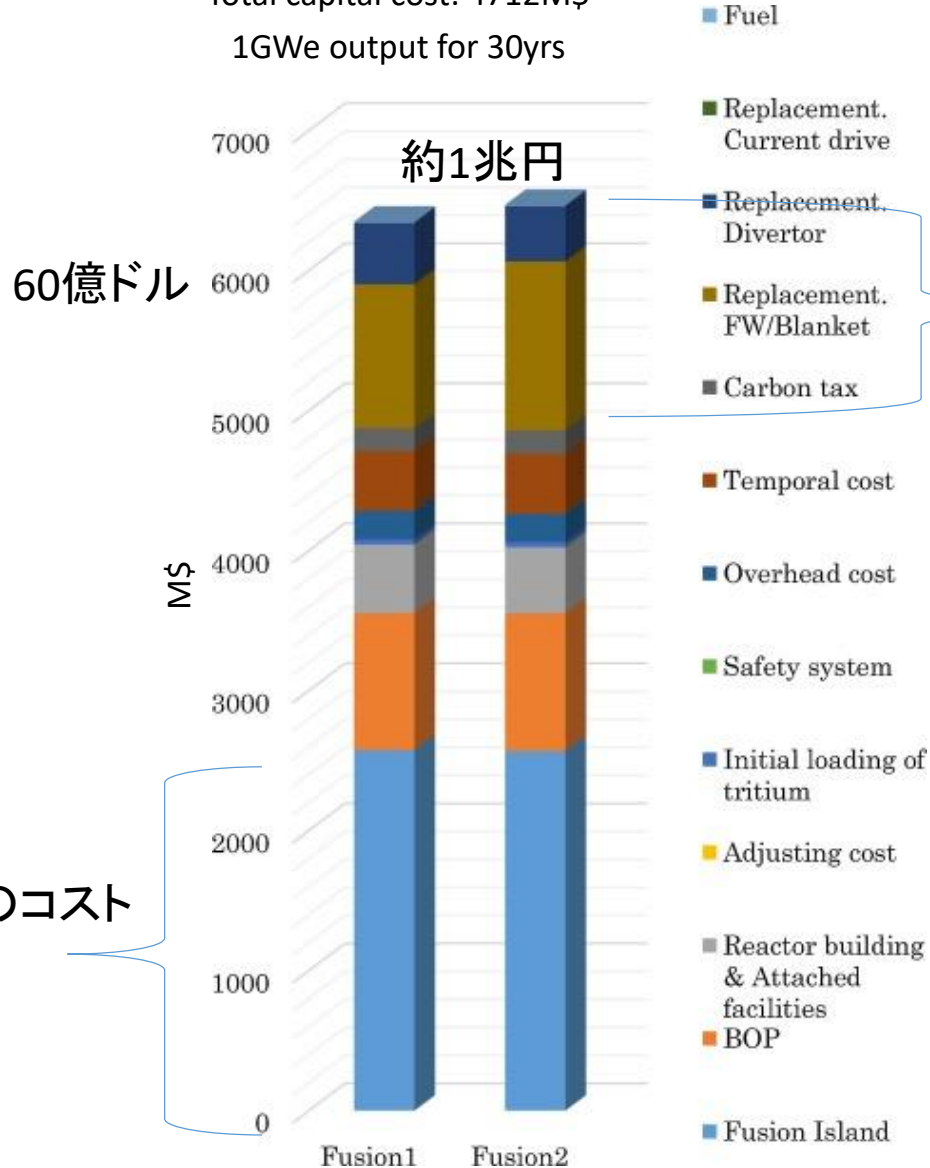


DATA2

- 1.TFコイル電流密度のオプション.IFJTF .. 1.
- 2.TFコイル導体部電流密度初期値.TFJW0 .KA/CM**2. 2.5.
- 3.TFコイル構造材電流密度初期値.XJTFO .KA/CM**2.1.25.
- 4.TFコイル本数.NTF .本.18.0.
- 5.TFコイル最大磁場.BTMAX .T .13.0.
- 6.コイル導体-構造材の電流密度比 .RSWST ..1.10.
- 7.TFコイル空間占有率.FTSP..0.60.
- 8.TFコイル許容リップル値.ALPRIP.. 1.5.
- 9.TFコイル応力でのint Bpn.BPFIN ..0.50.
- 10.PF-コイル/TF-コイル体積比 .FPF ..0.25.
- 11.主要支持構造物/TFコイル体積比 .FST ..0.75.
- 12.重量密度ブランケット.ROWB.TON/M**3. 4.1.
- 13.重量密度遮蔽体.ROWS.TON/M**3. 7.8.
- 14.重量密度TF-コイル.ROWTF .TON/M**3. 7.9.
- 15.重量密度PF-コイル.ROWPF .TON/M**3. 7.9.
- 16.重量密度主要支持構造物.ROWST .TON/M**3. 6.0.
- 17.為替レート .ERATE .¥/\$. 200.0.
- 18.資本費率 .FCR ./100 .0.12.
- 19.年間インフレ率 .CER ./100 .0.00.
- 20.建設期間 .CPRD.年 . 6.0.
- 21.プラント設備利用率 .FAV ./100 .0.75.
- 22.間接費倍率 .FIND./100 .1.05.
- 23.建設中利子倍率 .FCAP./100 . 1.100.
- 24.BOPcost scaling則の係数 .CREFB0.M\$.893..
- 25.BOPcost scaling則規格化熱出力 .PTHN.MW.4150.0.
- 26.BOPcost scaling則のべき乗指数 .GAMBOP..0.60.
- 27.建て屋scaling則の係数 .CREFRB.M\$.416..
- 28.建て屋scaling則の規格化体積 .VFIN.M**3.5100.0.
- 29.建て屋scaling則のべき乗指数 .GAMRB .. 0.670.
- 30.FUSIONスケーリング則の係数 .CREFFI.M\$.110..
- 31.調整費の率.FCCON ./100 .0.00.
- 32.耐用年間均等化経費率(運転維持.FOM ./100 .0.04.
- 33.重量単価 ブランケット.DOLB.\$/KG.96.6.
- 34.重量単価 遮蔽体.DOLS.\$/KG.17.0.
- 35.重量単価 コイル.DOLTC .\$/KG.50.0.
- 36.重量単価 コイル.DOLPC .\$/KG.50.0.
- 37.重量単価 構造物.DOLST .\$/KG.29.0.
- 38.重量単価 補助加熱.DOLA.\$/MW. 4.6.
- 39.重水素の単価.DOLDD .\$/KG.2700.0.
- 40.重水素の消費量.COMDD .KG/DAY.0.30.
- 41.プラント運転年数 .NLF .年.30.0.
- 42.中性子フルエンス限界.FWN .MW Y/M**2 .10.0.
- 43.トリチウムの初期装荷量.COMTR .KG.27.3.
- 44.トリチウムの重量単価.DOLTR .\$/KG. 1350000.0.
- 45.重量密度ダイバータ板.ROWD.TON/M**3.6.80.
- 46.重量単価ダイバータ板 .DOLD.\$/KG. 140.0.
- 47.ダイバータ板厚さ .DIVER .M .0.05.
- 48.安全系の費用.CSAFE .M\$.00.0.
- 49.廃棄物処理費用.COESD .MILLS/KWH .1.00.
- 50.廃炉費用.COEDC.MILLS/KWH .0.50.
- 51.利子率 .CEPS./100 . 0.072.
- 52.年間トリチウム売却量.WT.KG.20.0.
- 53.加熱機器費用の定期交換分の割合.FASRC ./100 . 0.0.
- 54.PFコイル位置パラメータ1.DPF1.m . 0.5.
- 55.PFコイル位置パラメータ2.DPF2.m . 0.5.
- 56.磁気軸位置パラメータ .PCRM.. 0.4.
- 57.PFコイル許容電流密度 .PJPF.MA/m**2 .24.0.
- 58.H計算のオプション .IHOPT .. 1.
- 59.Q計算のオプション .IQOPT .. 1.
- 60.プラズマ電子密度(LHW).ENE .1/m**3. 5.0E+18.
- 61.入射RFのスペクトル .ENPA.. 1.5.
- 62.アップシフトファクター .BETRF .. 1.4.
- 63.RFパワーのプラズマへの吸収率.EEABS ..0.75.
- 64.プラズマ電流立ち上げ時間 .ETRAMP.s . 100.0.
- 65.プラズマ電流にかかる係数 .ECIPRF.. 0.9.
- 66.逃走電子密度計算で使う定数lnΛ.EPRAM ..15.0.
- 67.YIELD STRENGTH OF SUS304LN.SIGY4 .MPa .1530.4.
- 68.YIELD STRENGTH OF SUS316LN.SIGY6 .MPa .1722.4.
- 69.TENSILE STRENGTH OF SUS304LN.SIGU4 .MPa .3296.2.
- 70.TENSILE STRENGTH OF SUS316LN.SIGU6 .MPa .2756.0.

核融合炉の発電コスト試算の一例

Total capital cost: 4712M\$
1GWe output for 30yrs



超伝導コイルのコスト削減は必須！

構造材料の革新が必要！

ダイバータやブランケットの交換頻度を下げられればコストも下げられる

	Fusion1	Fission	LNG	Oil fired	Hydro-powered	Geothermal	Photovoltaics	Wind-powered
Electricity cost [2] [\$/kWh]	0.1505	0.1000	0.1460	0.1750	0.1300	0.1050	1.4600	0.8780
Carbon tax [\$/kWh]	0.0017	0.0013	0.0293	0.0503	0.0007	0.0009	0.0026	0.0017
Total cost [\$/kWh]	0.1522	0.1013	0.1753	0.2253	0.1307	0.1059	1.4626	0.8797

The tokamak fusion reactor achieves under 0.174\$/kWh electricity cost, the tokamak fusion reactor is contestable with 1500 degrees-class LNG-fired combined cycle power plant.

まとめにかえて

- 核融合炉工学の全貌を語るには時間も実力も足りないが、香りを漂わせることが出来たなら幸いである。
- 核融合炉材料工学だけでも課題は山積みである。
 - スタートアップには手を出しにくいし、QSTやNIFSでもほとんど手が出せていない（出せない）領域も存在する：中性子+トリチウムへの投資と人材参画が必須！
- このような状況をチャンスと捉えるか、困難と捉えるかは皆さん次第である。