

エネルギー工学概論

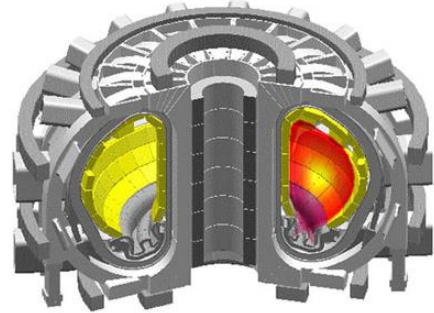
— 第13回(材料系第6回)核融合炉材料 —

プラズマ対向壁、機器
Plasma Facing Materials (Wall), Components

- ④ ブランケット (Blanket)
- ⑤ ダイバータ(Diverter)

1

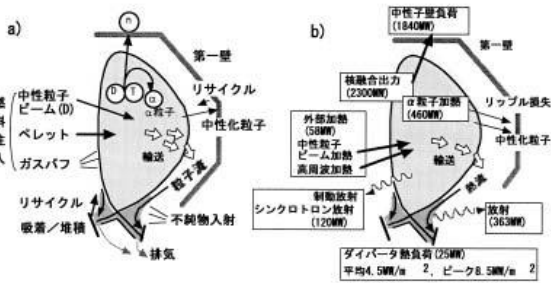
⑤ ブランケット ブランケット(黄) Li化合物など



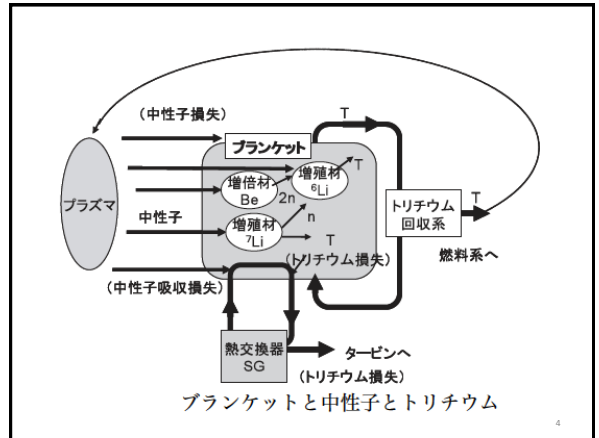
熱除去・回収とトリチウム増殖

2

ブランケット周辺の現象及び熱負荷



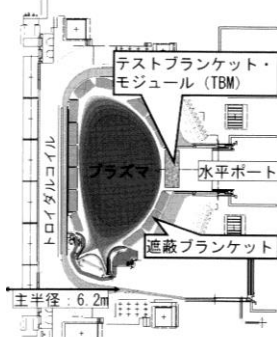
3



ブランケットと中性子とトリチウム

4

ITERの Blanket



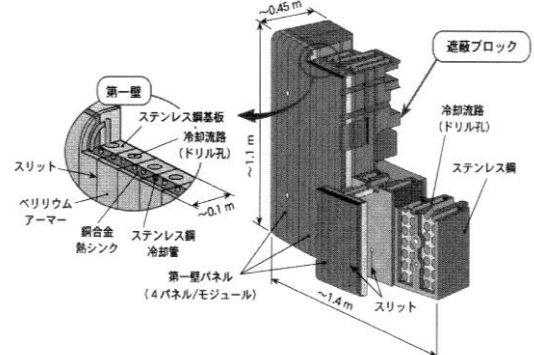
交換可能

固定

Fig. 1 ITER 断面図

5

ITERの第一壁と遮蔽ブランケット(固定)



ITER 遮蔽ブランケットの構造(インボード側モジュール).

6

ITERの第一壁と遮蔽ブランケット(固定)

遮蔽ブランケットの設計条件.

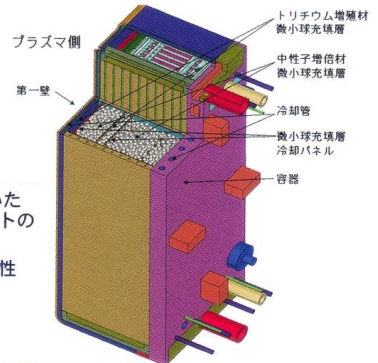
| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 総入熱量 (MW) | 690 |
| 第一壁表面熱負荷 (MW/m ²) | 0.25 (平均) 0.5 (最大) |
| 中性子壁負荷 (MW/m ²) | 0.56 (平均) 0.78 (最大) |
| 第一壁総面積 (m ²) | 680 |
| モジュール重量 (t) | 4.5 以下 (1モジュールの重量制限値) |
| 代表寸法 (m) | 約 1.4 × 1.1 × 0.45 |
| 冷却水入口温度 (°C) | 100 |
| 冷却水入口圧力 (MPa) | 3 |

ITERの Blanket

TEST BLANKET MODULE

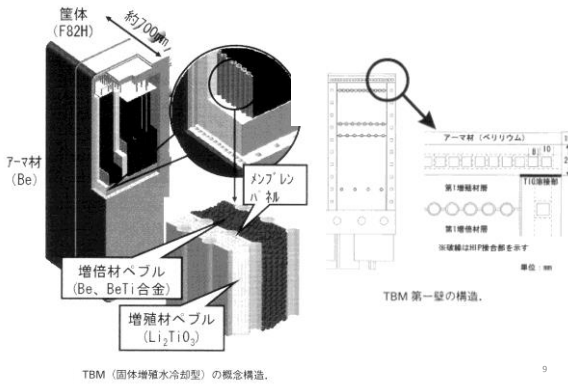
ITERを用いた
発電ブランケットの
工学試験

- ・トリチウム増殖特性
- ・発電特性



発電ブランケット工学試験モジュール

ITERの Test Blanket Module (TBM)



TBM (固体増殖水冷却型) の概念構造.

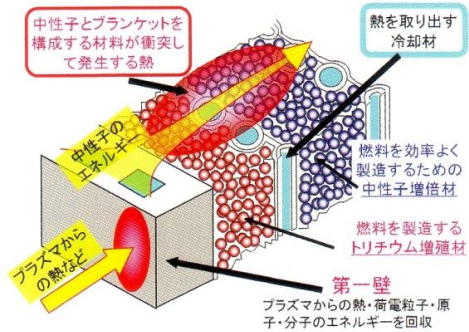
ITERの Blanket

遮蔽ブランケット、TBMおよび原型炉ブランケットの冷却条件

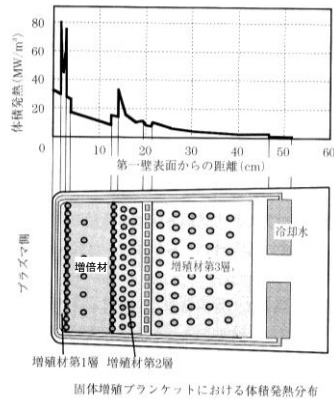
| | TBM (固体増殖水冷却方式) | ITER 遮蔽ブランケット | 核融合原型炉 (slimCS) [5] |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|---------------------|
| 表面熱負荷 (MW/m ²) | | 0.5 | 1.0 |
| 中性子壁負荷 (MW/m ²) | | 0.78 | 3.2 |
| 冷却水温度 (°C) | 280~325 (280~510*) | 100 | 280~510 |
| 冷却水圧力 (MPa) | 15 (25*) | 3 | 15~25 |

*カッコ内は先進オプション(超臨界圧水オプション)の条件を示す.

ブランケットからエネルギーを取り出す概念図



ブランケット内発熱密度の例



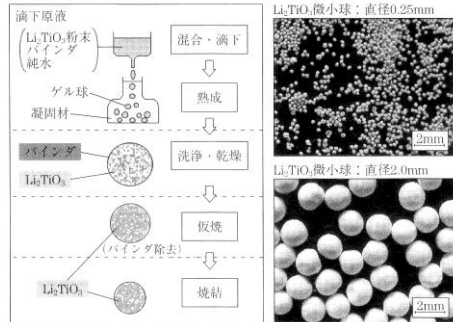
固体増殖ブランケットにおける体積発熱分布

各種固体トリチウム増殖材の特性比較

| 特性 | 材料 | Li ₂ O | Li ₂ TiO ₃ | Li ₂ ZrO ₃ | Li ₂ SiO ₃ | γ-LiAlO ₂ |
|------------------------------|----|--------------------------|--|---|--|---|
| 融点 (K) | | 1696 | 1808 | 1888 | 1523 | 1883 |
| 理論密度 (g/cm ³) | | 2.02 | 3.43 | 4.15 | 2.21 | 2.55 |
| Li 原子密度 (g/cm ³) | | 0.94 | 0.43 | 0.38 | 0.51 | 0.27 |
| 熱伝導率 (500°C) (W/m°C) | | 4.7 | 1.8 | 0.75 | 2.4 | 2.4 |
| 熱膨張率 (500°C) (ΔL/L%) | | 1.25 | 0.8 | 0.50 | 1.15 | 0.54 |
| 水との反応性 | | 反応性大 | 反応性無 | 反応性無 | 反応性小 | 反応性小 |
| トリチウム保持時間 (h)・(440°C) | | 8.0 | 2.0 | 1.1 | 7.0 | 50 |
| スエリング* (ΔV/V%) | | 7.0 | — | <0.7 | 1.7 | <0.5 |
| 放射化生成物 | | ³⁰ O(n, p):7s | ⁴⁰ Ti(n, p):84d ⁴² Ti(n, p):3.4d ⁴⁸ Ti(n, p):1.8d | ⁹² Zr(n, p):64h ⁹² Zr(n, n):57d ⁹² Zr(n, a):10y ⁹² Zr(n, 2n):64d | ²⁸ Si(n, 2n):4s ²⁸ Si(n, p):6m ²⁸ Si(n, a):9m | ²⁷ Al(n, 2n):6s ²⁷ Al(n, p):9.5m ²⁷ Al(n, a):15h |

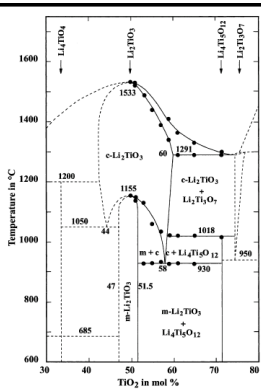
* : 気圧燃焼率 3 atm% (500°C)

固体増殖材の製造方法の例(Li₂TiO₃)



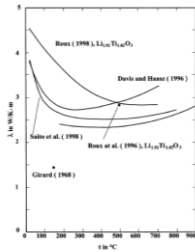
湿式造粒法によるトリチウム増殖材微小球の製造プロセスおよび外観写真 (Li₂TiO₃の場合)、粉末を含んだ粘度の高い液体を滴下し、人工いくらを作るように製造する

14



Li₂O-TiO₂状態図
融点: 1533°C
相転移: 1155°C
(単斜晶⇔立方晶)

熱伝導度



15

増殖材の燃焼損失の例(Li₂TiO₃)

30%⁶Li濃縮Li₂TiO₃を900°C(水素添加ガス中)にて2年間使用した際の試料1molあたりのLi損失量。

| | ITER 条件 | 原型炉条件 |
|--|--|---|
| 燃焼によるLi損失量 (mol) | 0.01 | 0.20 |
| 蒸発によるLi損失量 (mol) | 0.07 未満 | 0.07 |
| Li損失量の合計 (mol) | 0.08 未満 | 0.27 |
| 運転後のLi ₂ O/TiO ₂ 比 | 0.960 | 0.865 |
| 運転後の試料組成 | Li _{1.92} TiO _{2.96} | Li _{2-x} TiO _{3-y} , Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ , LiTiO ₂ |

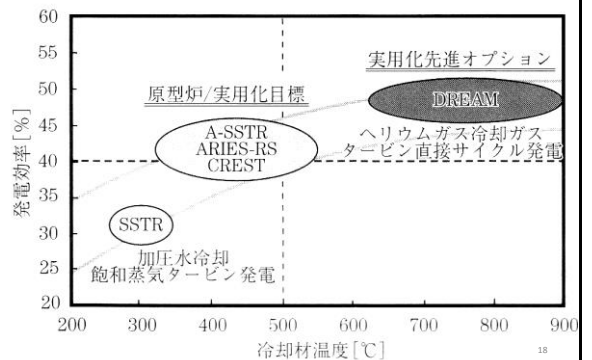
16

トカマク型核融合炉概念におけるブランケットの増殖材/構造材/冷却材の組合せ

| 炉概念 | SSTR ¹⁾ | A-SSTR ²⁾ | CREST ³⁾ | FFHR ³⁾ | ARIES-RS ³⁾ | DREAM ³⁾ |
|--------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| 増殖材 | 固体増殖材 | 固体増殖材 | 固体増殖材 | 溶融塩 FLBe | 液体 Li | 固体増殖材 |
| 構造材 | フェライト鋼 | ODS フェライト鋼 | フェライト鋼 | フェライト鋼 | V 合金 | SiC/SiC |
| 冷却材 | 水 | 水 | 水 | 溶融塩 FLBe | 液体 Li | ヘリウム |
| 入口/出口温度 (°C) | 285/325 | 283/538 | 100/480 | 450/550 | 330/610 | 600/900 |
| 圧力 (MPa) | 15.5 | 25 | 13 | 0.5 | 0.5 | 10 |

17

ブランケット冷却方式と発電効率



18

液体増殖材の特性比較(固体増殖材とは炉構造が変わる)

| | Li (500 K) | Li ₂ Pb ₈ (513 K) | Flibe (Li ₂ BeF ₄) (800 K) |
|----------------------------|------------------|--|--|
| 密度 (g/cm ³) | 0.509 | 9.59 | 1.99 |
| Li 密度 (g/cm ³) | 0.509 | 0.065 | 0.279 |
| 融点 (K) | 453 | 508 | 732 |
| 熱伝導度 (W/m/K) | 41.4 | 12.2 | 1.00 |
| 定圧比熱 (kJ/kg/K) | 4.33 | 190 | 2.39 |
| 電気抵抗率 (Ω·cm) | 27.6 | 124- | 5.88×10 ⁹ |
| 粘性率 (mPa·s) | 0.558 | 2.86- | 7.50 |
| トリチウム放出特性 | トリチウム溶解度が大きく回収困難 | トリチウム溶解度が小さく透過・漏洩対策必要 | トリチウム溶解度が小さく透過・漏洩対策必要 |
| 空気・水との反応性 | 激しく反応 | 緩やかに反応 | ほとんど反応しない |
| 構造材への腐食性 | 大 | Li よりも大 | TF 生成により HF より卑な金属がフッ化・溶出 ¹⁹⁾ |

ITERのTBM

各極のTBM形式と構造材料

| 国 | ポトマスター | TBM 形式 | 構造材料 | | |
|-----|--------|-------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|
| | | | 第1段階 | 第2段階 | |
| 日本 | ○ | WCCB | 固体増殖水冷却 | RAFS | RAFS・ODS |
| 欧州 | ○ | HCSB | 固体増殖・He 冷却 | RAFS | RAFS・ODS (SiC/SiC) |
| 中国 | ○ | HCSB | 固体増殖・He 冷却 | RAFS | RAFS・ODS (SiC/SiC) |
| 米国 | - | DCLL | 液体 LiPb 増殖 / 二流体冷却 | RAFS | RAFS・ODS (SiC/SiC) |
| 韓国 | △ | HCSB (HCML) | 固体増殖・He 冷却 (液体 Li 増殖・He 冷却) | RAFS | - |
| ロシア | - | HCML | 液体 Li 増殖・He 冷却 | F/M steel [†] | V alloy |
| インド | - | LLCB | 液体 LiPb・固体増殖・He 冷却 | F/M steel [†] | - |

*従来の耐熱鋼 (ferritic/martensitic steel)

RAFS: Reduced-Activation Ferritic (Martensitic) Steels

20

中性子増倍材 (n, 2n) 反応利用) の核的性質 中性子増倍材が機能しなければトリチウム増殖は難しい

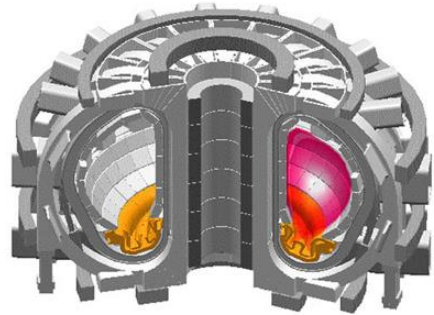
表 11.2 代表的な中性子増倍材の核的性質

| 特性 | 密度 (g/cm ³) | 原子数密度 ×10 ²² (n/cm ³) | 熱伝導率 (W/m/K) | 融点 (°C) | (n, 2n) 反応断面積* (barn) | (n, 2n) 反応しきいエネルギー (MeV) | 捕獲断面積 (barn) |
|-----|-------------------------|--|--------------|---------|-----------------------|--------------------------|--------------|
| Be | 1.8 | 120 | 188 | 1284 | 0.5 | 1.9 | 0.0095 |
| BeO | 3.0 | - | 200 | 2520 | - | - | - |
| Pb | 11.3 | 3.3 | 35 | 327 | 2.2 | 6.8 | 0.17 |
| PbO | 9.5 | - | 2.8 | 888 | - | - | - |
| W | 19.3 | 6.3 | 178 | 3400 | 2.2 | 6.2 | 18.3 |

(核的性質は天然の場合を示す。*は 14 MeV, **は 0.0523 eV 時の値)

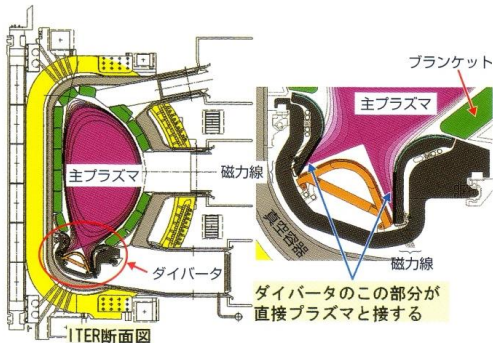
21

⑤ ダイバータ (オレンジ部分、Wなど)



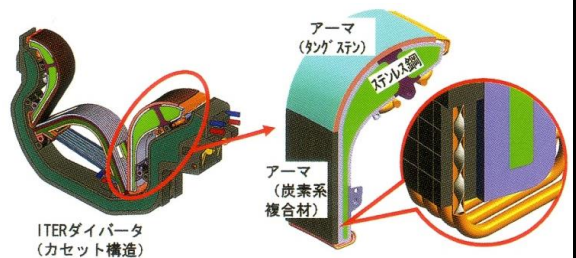
22

ITERの断面図とダイバータ部分の磁場配位

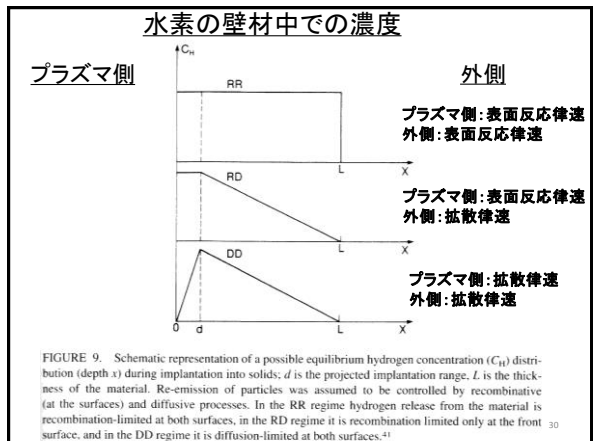
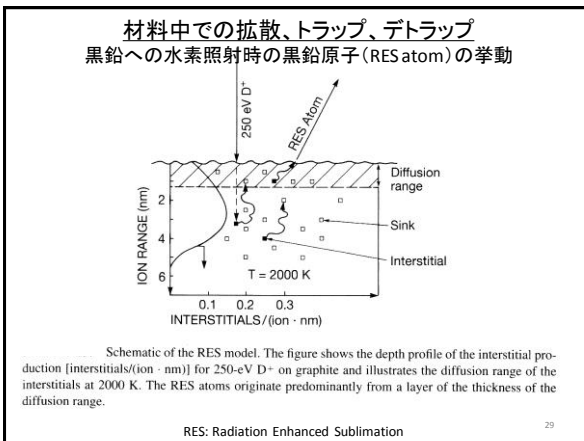
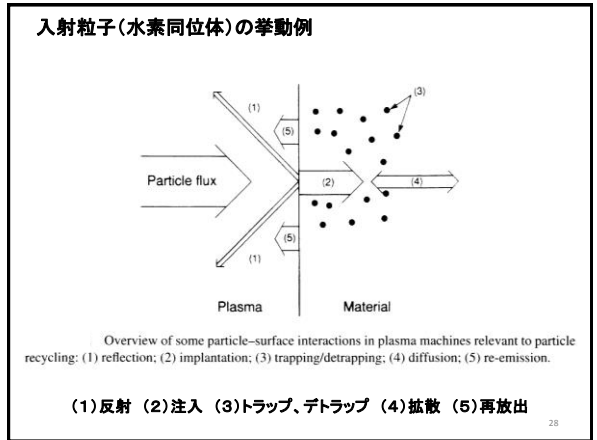
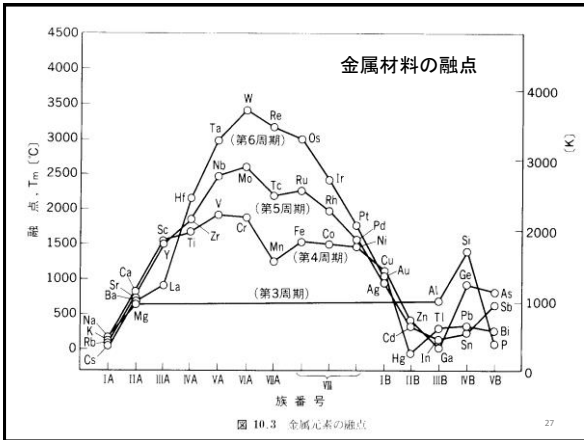
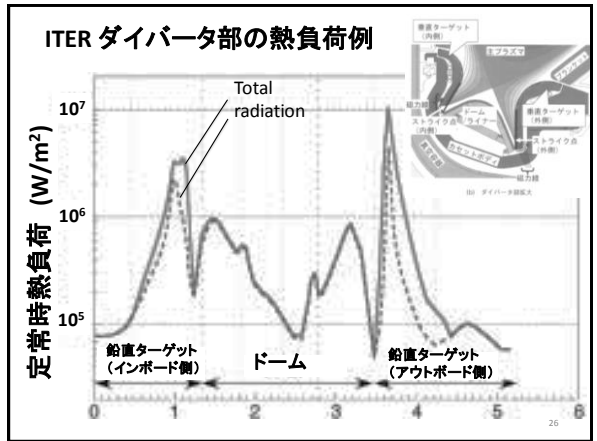
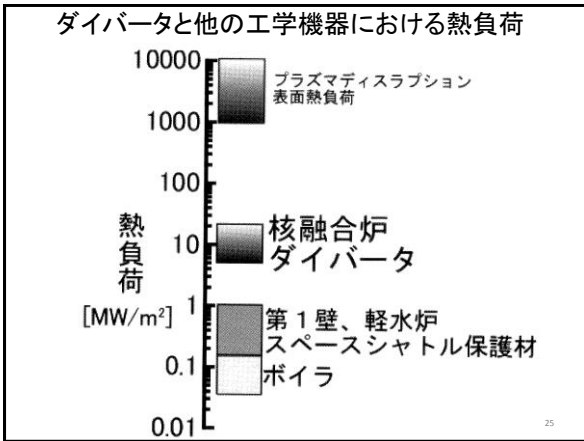


23

ITER用ダイバータの詳細構造

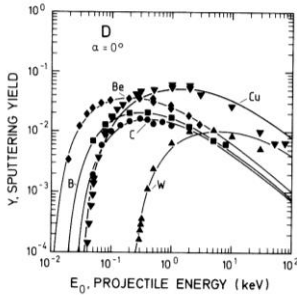


24



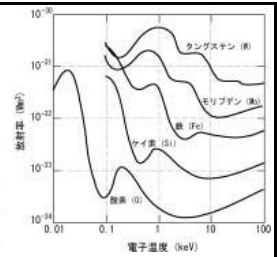
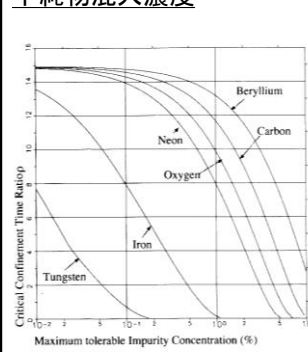
スパッタ率

スパッタ率の入射粒子エネルギー依存性
入射粒子とターゲットの質量数が近いとスパッタ率は上昇



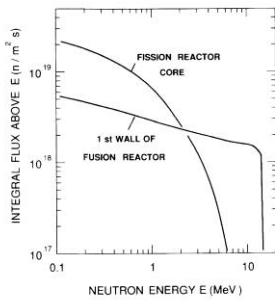
Sputtering yield Y versus the projectile energy E_0 when Be, B, C, Cu, and W are bombarded with deuterium at normal incidence, $\alpha = 0^\circ$. Data are calculated with the Monte Carlo program TRSPVMC.

許容されるプラズマへの不純物混入濃度



プラズマ中の不純物による輻射

中性子束密度の比較(分裂炉と融合炉)



Comparison of the integrated neutron flux spectra in the core of a typical fast fission test reactor (row 2 in EBR-II) and in the first wall of a conceptual fusion reactor with 2 MW m^{-2} neutron wall loading. The high portion of 14.1-MeV neutrons comes directly from the burning plasma; the tail at lower energies is due to neutrons moderated and backscattered in the blanket. Note the logarithmic scales in considering the difference between fission and fusion neutron spectra.

炭素のはじき出しエネルギーの閾値の例

Summary of reported values of carbon atom displacement threshold energy, E_d

| Source | Displacement energy ^a E_d (eV) |
|----------------------------------|--|
| Eggen ³² | 24.7 ± 0.9 |
| Lucas and Mitchell ³³ | 60 |
| Ohr <i>et al.</i> ³⁴ | 24 |
| Montet ³⁵ | 33 |
| Montet and Myers ³⁶ | 31 (E_{dn}), 60 (E_{dp}) |
| Iwata and Nihara ³⁷ | 28 (E_{dn}), 42 (E_{dp}) |
| Koike and Pedraza ³⁸ | 30.5 ± 2 |

^a E_{dn} = normal to basal planes; E_{dp} = parallel to basal planes.

実証炉(DEMO炉)での核変換による生成元素とFe、Moへの溶解量

Production rate during DEMO exposure²⁴ and solubility of some foreign elements in Fe and Mo

| Material | Element produced | Production rate in DEMO [at. conc./yr] | Solubility at $0.4 T_m$ [at. conc.] |
|----------|------------------|--|-------------------------------------|
| Fe | H | 1.8×10^{-3} | 3×10^{-5} |
| | He | 2.6×10^{-4} | $\sim 10^{-28}$ |
| | V | 3×10^{-5} | 0.23 |
| | Cr | 3×10^{-4} | 1 |
| | Mn | 2×10^{-3} | 0.03 |
| | Co | 4×10^{-6} | 0.75 |
| Mo | H | 7.3×10^{-4} | 2×10^{-5} |
| | He | 1.9×10^{-4} | $\sim 10^{-25}$ |
| | Zr | 2×10^{-4} | 0.07 |
| | Nb | 9×10^{-4} | 1 |
| | Tc | 9×10^{-3} | ? |
| | Ru | 8×10^{-4} | <0.01 |

実験炉 (Experimental) → 原型炉 (Prototype) → 実証炉 (Demonstration) → 商用炉 (Commercial)
実験炉 (ITER) → 原型炉 → 発電実証炉 (DEMO) → 商用炉

各種第一壁候補材料、ヒートシンク材料の物性一覧

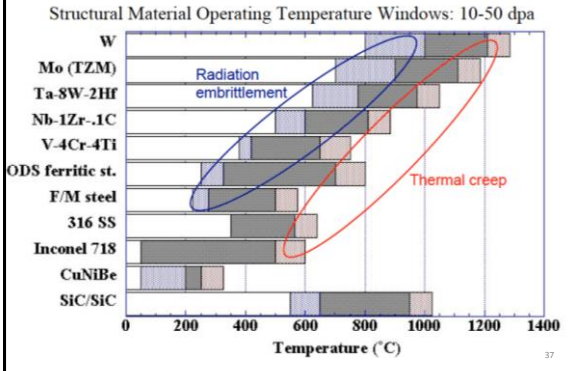
Physical Parameters of Typical Plasma Facing and Heat Sink Materials (At Room Temperature)

| Material | Density (kg m ⁻³) | Melting temperature (°C) | Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹) | Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | Tensile strength ^b (MPa) |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|--|-------------------------------------|
| Be ⁽¹⁾ | 1.85×10^3 | 1283 | 187 | 11.3 | 350 |
| graphite ⁽²⁾ | 1.85×10^3 | — | 80 | 3.4 | 50 |
| RG-T ⁽³⁾ | 2.2×10^3 | — | 576/112 ^a | 2-3/10 ^a | 30/6 ^a |
| A05 ⁽⁴⁾ | 1.8×10^3 | — | 234/76 ^a | 1.1/8.0 ^a | 54/9 ^a |
| MFC-1 ⁽⁵⁾ | 1.96×10^3 | — | 4251 | -0.9/12 ^a | 400/3 ^a |
| PG ⁽⁶⁾ | 2.2×10^3 | — | 5000 | 1.5/32 ^a | 100/2 ^a |
| B ₄ C ⁽⁷⁾ | 2.51×10^3 | ≈2450 | 29-67 | 5.6 | 350 |
| SiC ⁽⁸⁾ | 3.2×10^3 | — | 67 | 2.9 | 360 |
| Cu ⁽⁹⁾ | 8.25×10^3 | 1083 | 391 | 16.7 | 206 |
| 316L ⁽¹⁰⁾ | 7.96×10^3 | 1370-1400 | 14.6 | 16.2 | 525 |
| TZM ⁽¹¹⁾ | 10.2×10^3 | 2620 | 125 | 5.3 | 600 ^a |
| W ⁽¹²⁾ | 19.3×10^3 | 3410 | 144 | 4.4 | 600 ^a |

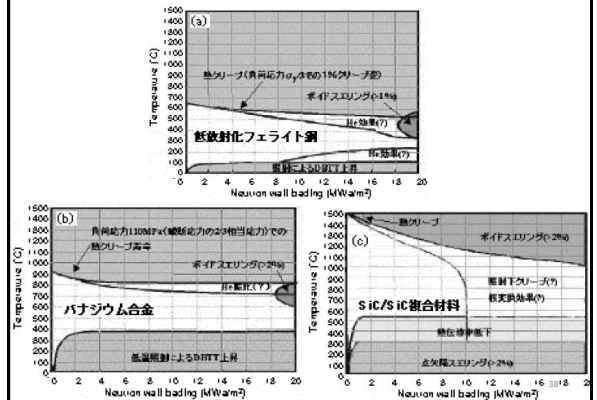
^aultimate strength; ^brecrystallized.

⁽¹⁾hot pressed beryllium; ⁽²⁾fine grain graphite EK 98; ⁽³⁾Ti-doped graphite (RG-Ti-91); ⁽⁴⁾carbon/carbon composite AEROLOR 05; ⁽⁵⁾1-D carbon/carbon composite MFC-1; ⁽⁶⁾pyrolytic graphite; ⁽⁷⁾hot pressed boron carbide; ⁽⁸⁾CVD (pyrolytic) B-SiC; ⁽⁹⁾Oxygen-free high cond. (OFHC) copper; ⁽¹⁰⁾austenitic steel 316L (solution annealed); ⁽¹¹⁾Mo base alloy TZM (Mo-0.5 Ti-0.1 Zr); ⁽¹²⁾pure tungsten.

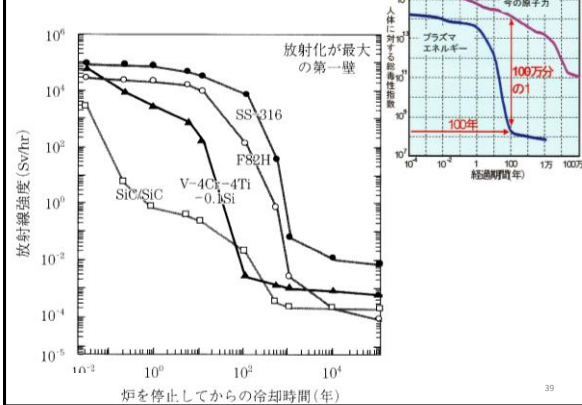
構造材料のoperating window



低放射化構造材料の候補材料における中性子熱負荷と使用温度



シャットダウン後の構造材料の放射線強度



まとめ

- ① 核融合炉の構成
- ② プラズマ対向壁
- ③ ブランケット
- ④ ダイバータ

課題-13

- ① プラズマ対向壁とは何か説明せよ。
- ② ブランケットの役割は何か説明せよ。また、固体ブランケットと液体ブランケットについても説明せよ。
- ③ ダイバータ材としてのタンゲステンと黒鉛の特徴を述べよ。

解答には、氏名、今日の日付を記入のこと。