# 原型炉におけるタングステン使用の影響

~中性子照射と崩壊熱、核変換~

染谷洋二、<u>朝倉伸幸</u>

日本原子力研究開発機構 核融合炉システム研究グループ

平成24年度 ダイバータ及びPWI合同会合 7月23-24日 筑波大学

### 核融合原型炉における安全性の観点から

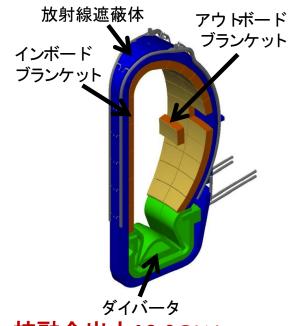
# □崩壊熱の影響と安全性評価

- □保守対象機器(ブランケット及びダイバータ等)の対向材・ 構造材の温度評価 ⇒ 本日の発表
  - ✓保守時には冷却配管を切断するため、補助的な冷却が必要
- □ 放射性廃棄物の処理/処分及び管理時の温度評価
- □ 事故時(LOCA, LOFA and LOVA等)に炉内機器の対向材・構造材の温度評価



- > 炉内機器の核変換特性を理解する必要がある
  - ✓ Wの崩壊熱密度は比較的高いため、定量的な検討が必要

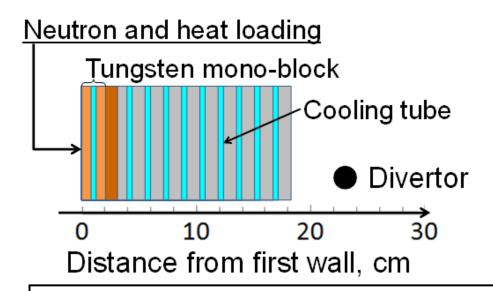
# 崩壊熱の計算条件(SlimCSの運転例)



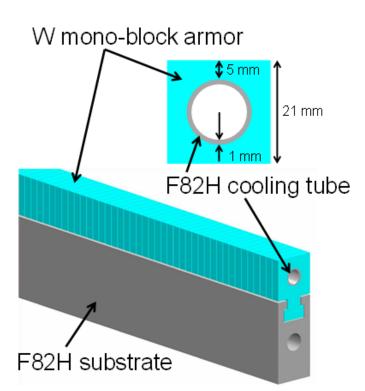
| ΓO                                  | 核融合出力:3.0GW gaying                       |   |  |  |  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|--|
| 5.0                                 | アウトボード インボードブランケット アウトボード<br>グランケット      |   |  |  |  |
| [3.0] 4.0                           |  |   |  |  |  |
|                                     |  |   |  |  |  |
| 型<br>型<br>型<br>型<br>1.0<br>型<br>1.0 |  |   |  |  |  |
| 對                                   |  |   |  |  |  |
| 1.0                                 |  |   |  |  |  |
| 0.0                                 | E  |   |  |  |  |
|                                     | 0 90 180 270 36<br>ポ <b>ロイダル方向角度 [度]</b> | 0 |  |  |  |

| 計算コード            | THIDA-2                |  |
|------------------|------------------------|--|
| 核データ             | FENDL-2.0              |  |
| 運転時間             | 2 <b>年</b>             |  |
| 核融合出力            | 3 GW                   |  |
| セクタ一数            | 12                     |  |
|                  |                        |  |
| 各種セクター内体積        | m <sup>3</sup> /sector |  |
| インボードブランケット      | 4.9                    |  |
| アウトボードブランケット     | 23.3                   |  |
| ダイバータ            | 5.3                    |  |
|                  |                        |  |
| <u>平均</u> 中性子壁負荷 | $MW/m^2$               |  |
| アウトボードブランケット     | 3.5                    |  |
| インボードブランケット      | 2.4                    |  |
| ダイバータ            | 1.2                    |  |

### 計算例:ダイバータ構造(タングステンと低放射化フェライト)



ダイバータ構造はWモノブロックと 支持台座(F82H)で構成: 仮設計

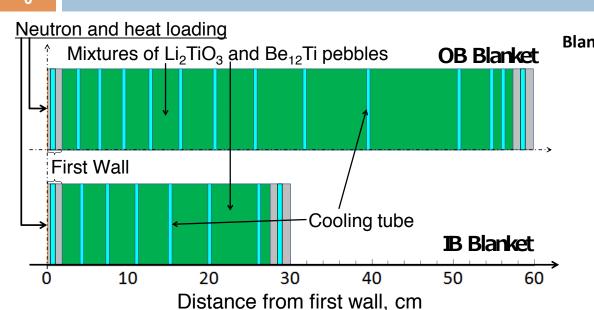


✓ 奥行方向のダイバータ厚さ: 18cm

ただし、

WとF82H接合部は平均した熱伝導度を仮定 台座部の複数の冷却管は台座の温度をほぼ一定にするために仮に入れたもの 現在、冷却水はベース温度290℃の加圧水(15MPa)の使用を想定

# 計算例:ブランケット構造(増殖・増媒材の混合充填)

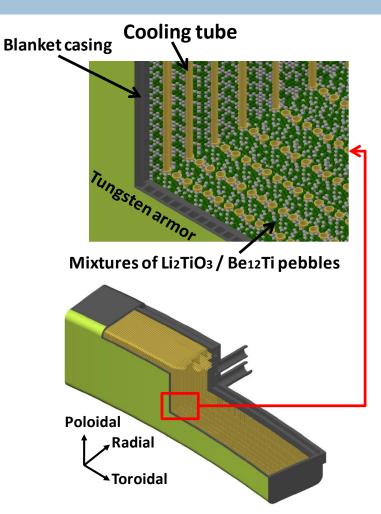


ブランケット計算モデル:スラブモデル.

### 径方向ブランケット厚さ

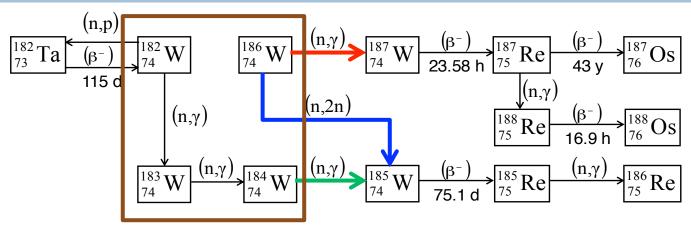
✓ IB ブランケット : 30 cm

✓ OB ブランケット: 60 cm



- □ Li₂TiO₃ (増殖)ペブル と Be₁₂Ti (増倍)ペブル を混合充填
- 第一壁対向材としてタングステン被覆の厚さを200μmとする

### 崩壊熱に主要なタングステン核種(185W 187W)の生成



\*天然 [182W:26.3%, 183W:14.3%, 184W:30.7%, 186W:28.6%]

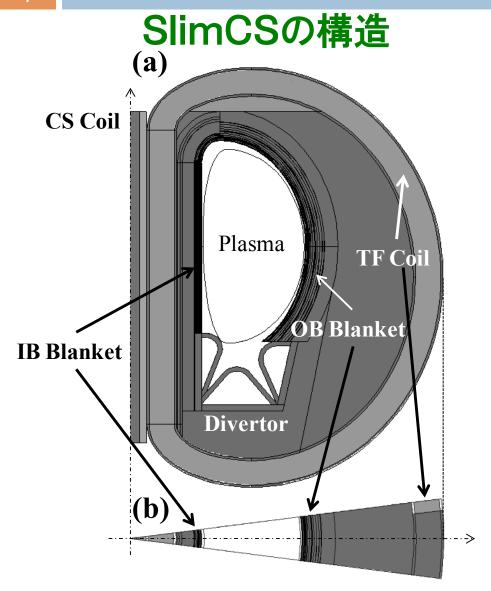
### タングステンの核変換における反応率の違い



<u>核変換には熱中性子</u> (0.025eV-100keV)の寄与が 大きい

186W (n,2n)は高速中性子が関与

### 中性子輸送は3次元計算モデルを使用

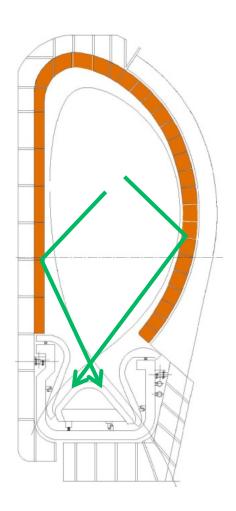


MCNP calculation model for SlimCS

- Calculation code
  - √MCNP-5 (3-D)
- Nuclear library
  - ✓ENDF/B-VII
- Geometry
  - ✓ Toroidal axisymmetry
  - √1/24 sector model
  - ✓ Reflecting boundaries.
- Neutron source
  - √ Volume source for plasma
    with energy of 14.06 MeV

# 3次元モデル(MCNP-5)では形状を考慮して計算

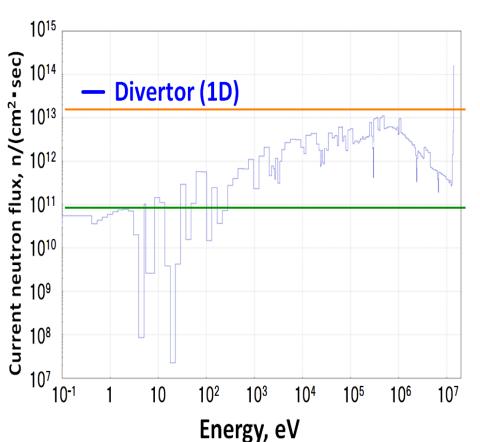
ブランケット領域で散乱された中性子はダイバータに熱中性子として 照射される

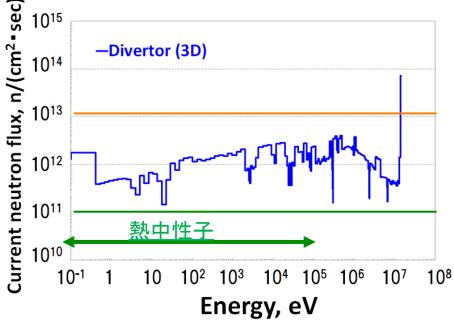


# 中性子スペクトル (1D vs 3D)

- 核変換には熱中性子(0.025eV-100keV)の寄与が大きい
- □ 3Dモデルでは熱中性子の照射量が増加

⇒ 3Dモデルで評価した中性子スペクトルで崩壊熱計算を行った

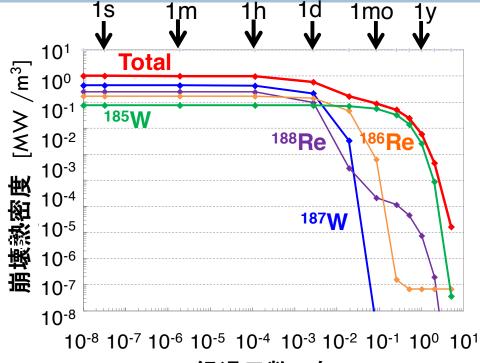




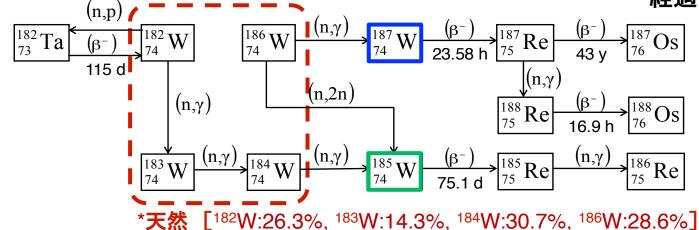
# タングステンの崩壊熱に寄与する主要核種

### ≪主要核種の生成と半減期≫

- $\checkmark$  <sup>187</sup><sub>74</sub>W:(n, $\gamma$ ) reaction
  - 主要期間 < 1 日(β崩壊)</p>
- ✓  $^{185}_{74}$ W:(n, $\gamma$ ) reaction:(n,2n) reaction
  - 1日 < 主要期間 < 1 年(β崩壊)</p>



#### 経過日数 [年]



# 低放射化フェライトの崩壊熱に寄与する主要核種

### ≪主要核種の生成と半減期≫

- $\checkmark$   $\binom{56}{25}$ Mn:  $(n, \gamma)$  reaction
  - ▶ 主要期間 < 3 時間
- $\checkmark$   $\binom{54}{25}$  Mn: (n,2n) reaction
  - ▶ 主要期間 <5年

$$\begin{array}{c}
56 \\
26 \\
Fe \\
2.58 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
(n, p) \\
25 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
56 \\
25 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
(n, \gamma) \\
55 \\
25 \\
\hline
 & \end{array}$$

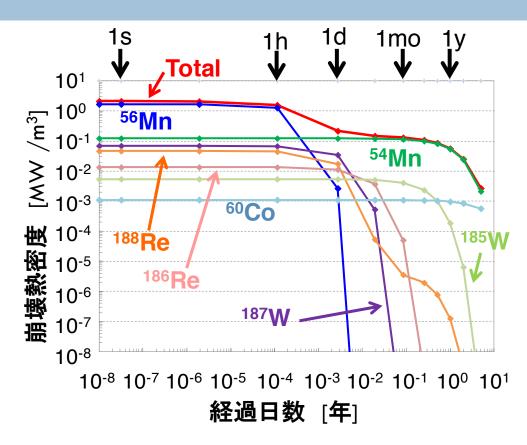
$$\begin{array}{c}
54 \\
26 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
(EC) \\
312.2 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
54 \\
24 \\
\hline
 & \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
54 \\
25 \\
\hline
 & \end{array}$$

\***天然[<sup>54</sup>Fe:5.8%**, <sup>56</sup>Fe:91.8%, <sup>57</sup>Fe:2.15%]

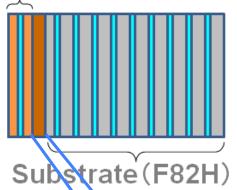


#### 注)

- F82H中の添加元素<sup>55</sup>Mnを0.1から0.44 wt.%に 増加した場合でも大きく崩壊熱に影響がない。
- ・ブランケットの後方では、熱中性子の増加に伴い、<sup>56</sup>Mnの生成が増加するが、中性子量が少なく崩壊熱密度は低い。

# ダイバータ・アーマー内の崩壊熱密度の分布

### Mono-block (W)



### 主要構造材、総体積、総重量

✓ モノブロック(W)

5.47m<sup>3</sup> 105.6t

√ 支持部(F82H)

56.88m<sup>3</sup> 448.8t

#### 崩壊熱の主要核種

 $^{187}_{84}$ W:(n, $\gamma$ ) reaction

 $^{185}_{84}$ W: (n,2n) reaction

 $_{25}^{56}$ Mn:(n, $\gamma$ ) reaction

 $^{54}_{25}$ Mn: (n,2n) reaction

### 2年間の運転停止直後の崩壊熱密度

W被覆表面

0.2

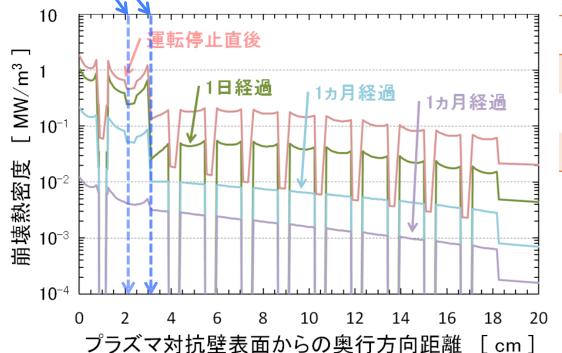
F82H表面

Unit: MW/m<sup>3</sup>

1.84

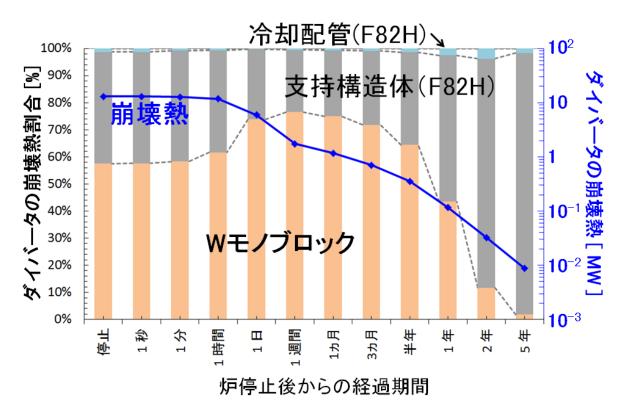
### 注)

1D計算モデルではW被覆表面の 崩壊熱は0.56MW/m3で 1/3以下



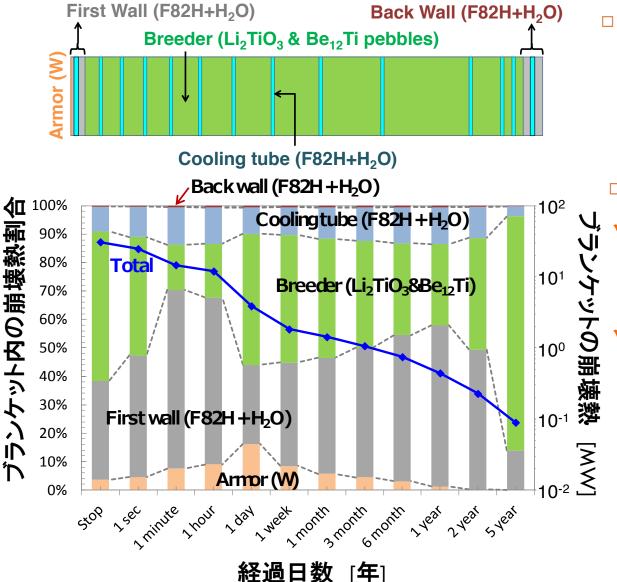
# ダイバータ・アーマーの崩壊熱の時間変化

- □ ダイバータにおけるタングステンの崩壊熱の問題
- ✓ ブランケットと異なりタングステンの重量が多い
- ✓ 運転直後からメインテナンス時(数ヶ月後程度)には、ダイバータ の発熱に寄与する割合は大きい



ンケット内の崩壊熱割

### ブランケット内の崩壊熱の時間変化



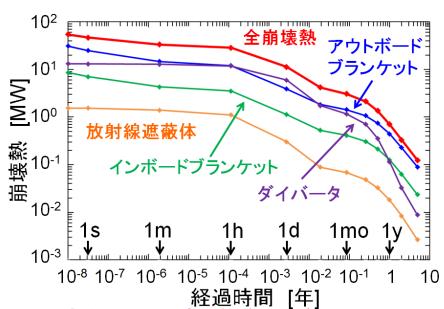
#### 主要構成材

- ✓ 第一壁(F82H, W)
- ✓ 増殖領域(Li₂TiO₃, Be₁₂Ti)

### タングステンの崩壊熱

- タングステンが0.2mm厚の 場合、他の構造材と比べて 体積が少ない。
- ブランケットの崩壊熱に寄 与する割合は少ない。

# 原型炉運転停止後における崩壊熱(SlimCSを想定)



| 経過時間    | 停止   | 1日   | 1ヶ月 |
|---------|------|------|-----|
| アウトボードB | 30.9 | 3.9  | 1.4 |
| インボードB  | 8.6  | 1.1  | 0.4 |
| ダイバータ   | 13.1 | 6.0  | 1.2 |
| 放射線遮蔽体  | 1.8  | 0.3  | 0.1 |
| 全崩壊熱    | 54.1 | 11.3 | 3.1 |

単位: MW

- 炉全体で、運転直後はブランケットの 崩壊熱が全崩壊熱の73%程度
  - ⇒ ブランケット内の<sup>6</sup>He(半減期0.8s)の 崩壊熱が顕著
- 運転停止後一ヶ月程度までは、 ダイバータの崩壊熱はブランケット (フェライト起因の54Mn)と同程度. ただし1ヶ月後の全崩壊熱は6%に減少.



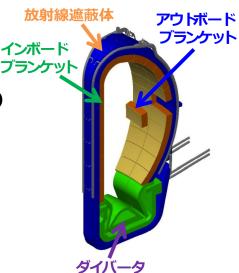
- ✓ 第一壁(F82H)
- ✓ 核種:<sup>56</sup>Mn (2.6 h)

  <sup>54</sup>Mn (312 d)

ダイバータ・アーマー

- ✓ モノブロック(W)
- ✓ 核種: 187W (1day)

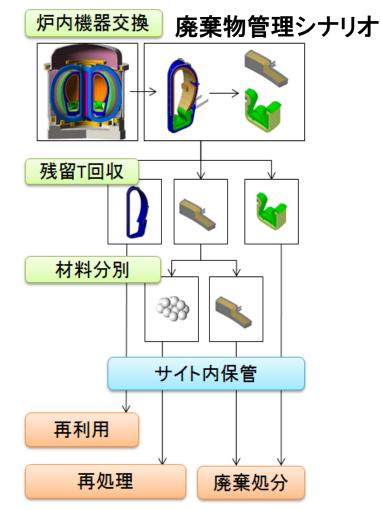
<sup>185</sup>W (75day)



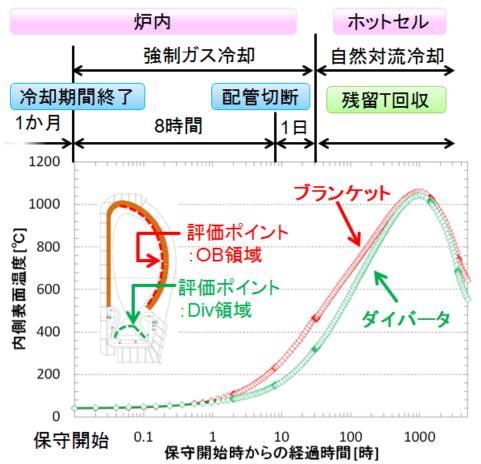
### 崩壊熱と温度管理は、保守作業の開始と工程に大きく影響

1ヶ月の冷却期間後(崩壊熱は運転直後の1/10に減少:0.1MW/m³)にダイバータおよびブランケットの交換を開始するシナリオを検討中

⇒ ダイバータ及びブランケット表面のW温度はそれぞれ1060、1043℃に達する



#### 保守時の対象機器温度推移



### タングステンの崩壊熱(3GW-2yrs核融合反応を発生後)について

運転中に発生するW表面での核発熱密度は 最大崩壊熱密度(1.8MW/m³)よりも 20倍大きい⇒ 深さ5mm、幅5cm、トロイダル1周分(10-2m³, 0.19t)では合計約0.3MW

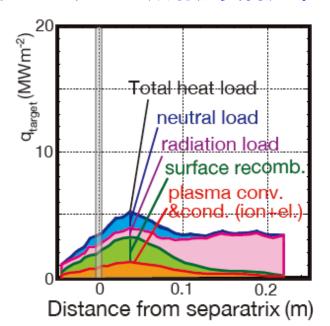
非接触ダイバータ運転中に同面積のWターゲットが受ける熱負荷は約10MW

⇒ プラズマ運転中(冷却中)は、大きなダイバータ熱負荷の熱除去設計が重要課題

#### ダイバータアーマーでの核発熱密度の深さ分布

> 運転中は、冷却水はベース温度290℃の 加圧水(15MPa, 流速6-8m/s)の使用を想定

非接触ダイバータにおいてターゲットが受けるプラズマ・放射熱負荷分布の例



# まとめ 1/2

- □ ブランケット及びダイバータ内で使用されるWの崩壊熱密度は大きい ダイバータでは総重量が多く、崩壊熱はWモノブロックが大部分(60-75%) 崩壊熱に起因する主要核種: 185W and 187W
- □ ブランケット内の崩壊熱は第一壁及び増殖領域が大部分 0.2mm厚の被覆Wの場合、総重量が少ないため、崩壊熱への寄与は少ない 崩壊熱に起因する主要核種: 第一壁(F82H)、増殖領域 (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>&Be<sub>12</sub>Ti)
- 運転停止後一ヶ月程度までは、ダイバータの崩壊熱はブランケット (フェライト起因の54Mn)と同程度. ただし1ヶ月後の全崩壊熱は6%に減少. その後は、ブランケットの崩壊熱が顕著
- ・ 崩壊熱と温度管理は、保守作業の開始(停止1年後)と工程に大きく影響

# まとめ 2/2

#### 今後の設計進展・タングステンの使用量の検討により、崩壊熱は大きく影響する:

- 対向壁へのプラズマ粒子束とエネルギー、スパッタリングによる損耗の評価
  - ⇒ダイバータ材厚(5mm)、ブランケット蒸着膜厚(0.2mm)増加 ⇒崩壊熱は増加
- 原型炉サイズおよびダイバータの拡大(核融合出力が同じなら)
- 安全性や保守期間の短縮などの要請が増す場合 ⇒核融合出力の設定を低減
  - ⇒単位面積あたりの中性子照射フルーエンスを低減 ⇒崩壊熱は減少
- 放射性廃棄物の処理・管理、事故時のシーケンスに大きな影響を及ぼすため、 こうした観点からも検討を開始している