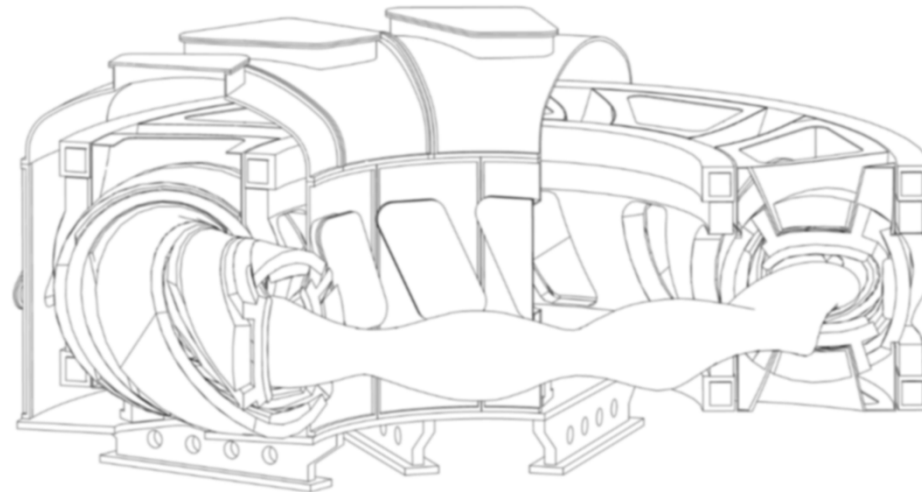
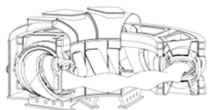


燃料増殖およびコイル遮蔽に求められる ブランケット・遮蔽体設置空間

- 1) ブランケット、遮蔽体の機能と候補材料
- 2) ブランケット必要厚み
- 3) 遮蔽体必要厚み
- 4) 設計パラメーターへの影響

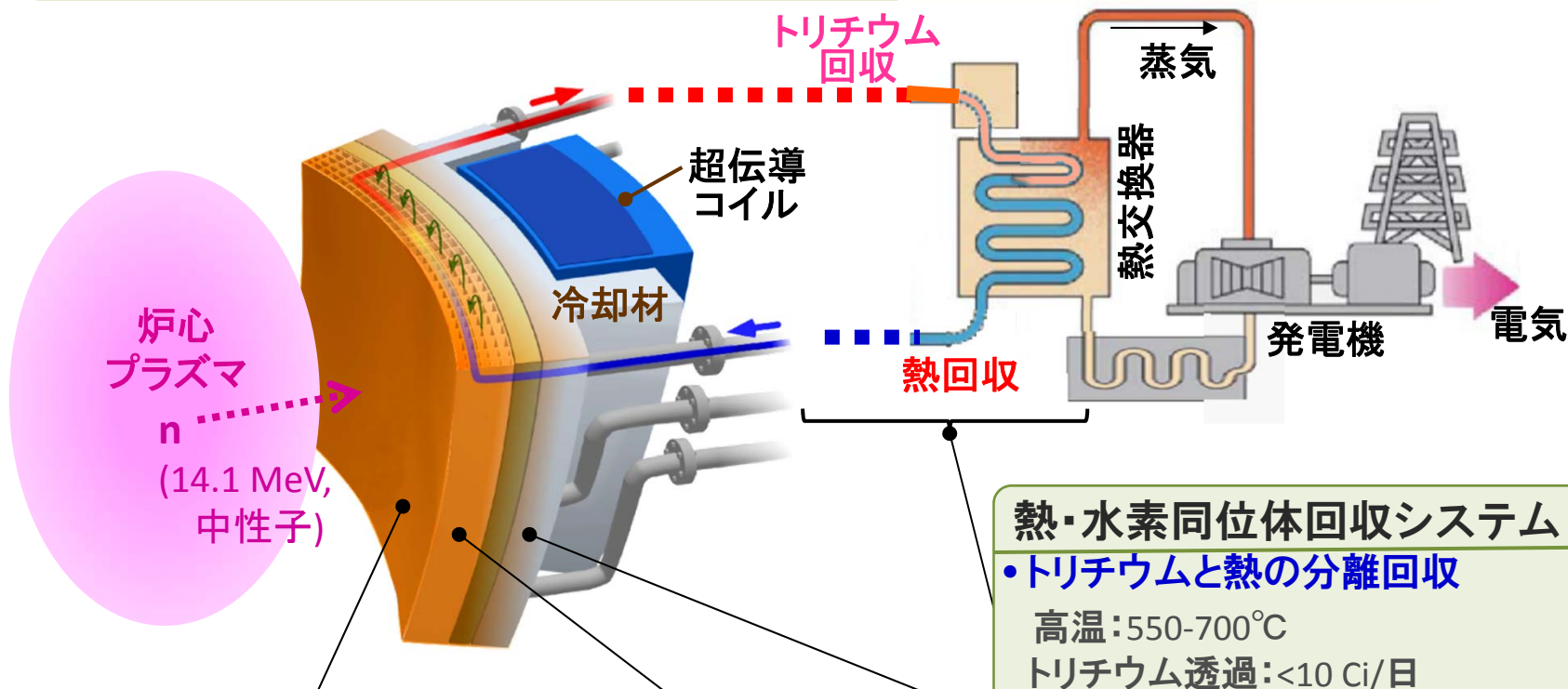


核融合科学研究所 田中 照也



ブランケットの機能と環境

➤ ブランケットは高放射線・高温環境下において、
 (1) 熱の取り出し (2) トリチウム燃料増殖 (3) 放射線遮蔽 を行う。



熱・水素同位体回収システム
 • トリチウムと熱の分離回収
 高温: 550-700°C
 トリチウム透過: <10 Ci/日

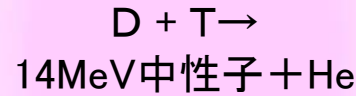
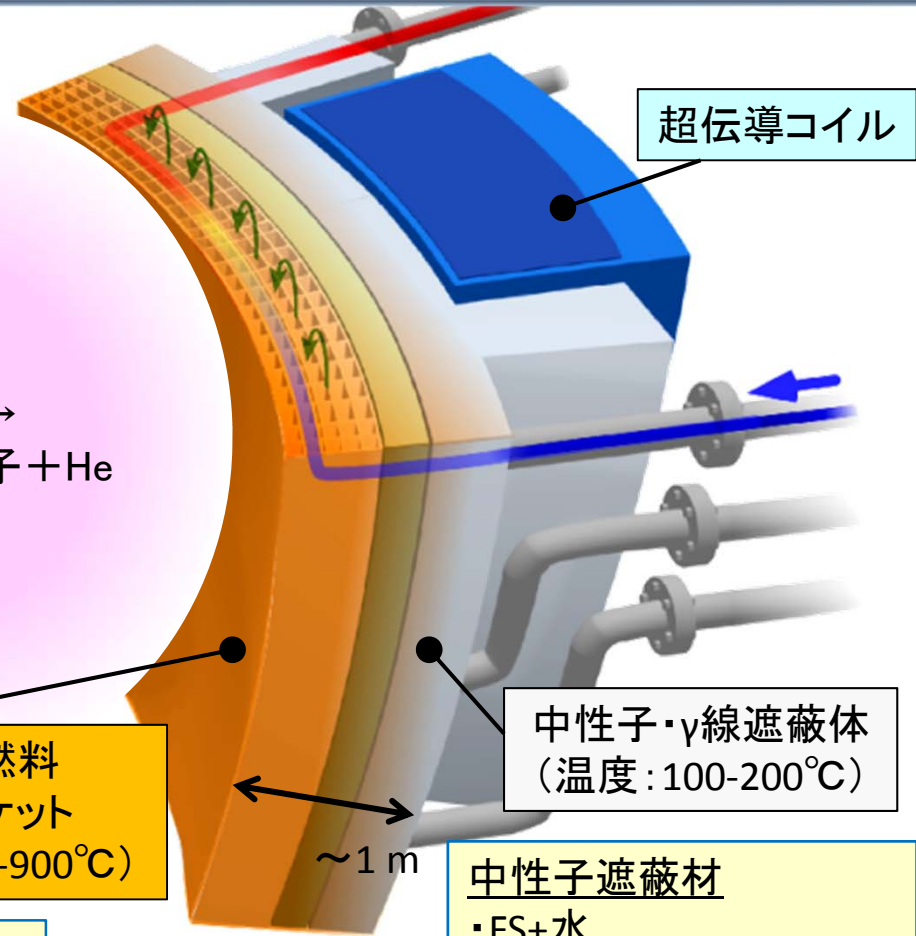
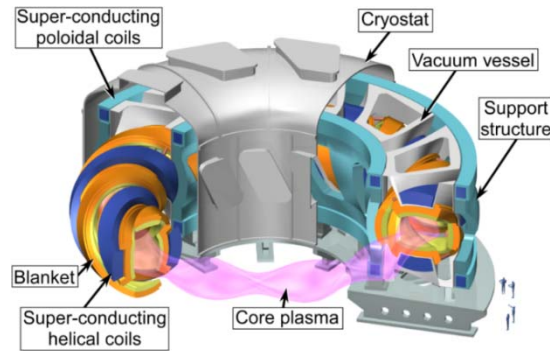
第一壁 (5-10 mm)
 • プラズマ対向壁としての健全性確保
 放射熱負荷: 0.1* -1.0 MW/m²
 核発熱: 10-20** W/cm³
 粒子負荷: ~10¹⁶ DT/cm²/s
 ~10¹³ He/cm²/s

増殖ブランケット (30-50 cm)
 • トリチウム増殖比 > 1.0
 • 熱の回収
 高温: 550°C(フェライト鋼)
 700°C(バナジウム合金)
 冷却材循環: 1.5 MPa, 1.5 m/s***

遮蔽ブランケット (50-70 cm)
 • 高速中性子束 4桁低減
 低温: 100-200 °C

*ヘリカル炉FFHR設計、
 **中性子壁負荷: 1.5 MW/m²
 ***Flibe冷却ブランケット

核融合ブランケット / 遮蔽体候補材料



炉心
プラズマ

アーマー材料
・タンゲステン

構造材料
・低放射化フェライト鋼 (FS)
・バナジウム合金
・SiC

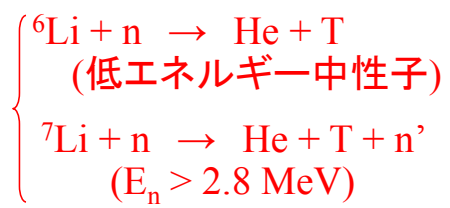
**トリチウム
燃料増殖材**
・ Li_4SiO_4 ・Li
・ Li_2TiO_3 ・LiPb
・ Li_2ZrO_3 ・FLiBe etc.

**トリチウム燃料
増殖ブランケット
(最高温度: 350-900°C)**

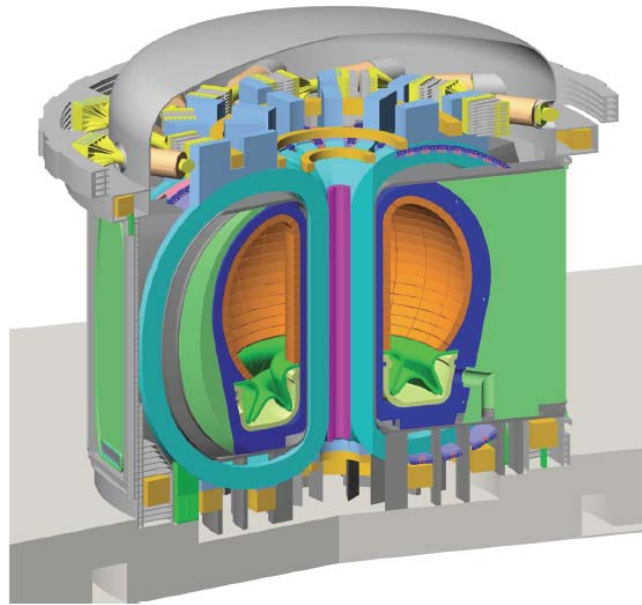
中性子増倍材
・Be ・ $Be_{12}Ti$
・Pb

冷却材
・水 ・Li (増殖材を兼ねる)
・He ・LiPb (")
・FLiBe (") etc.

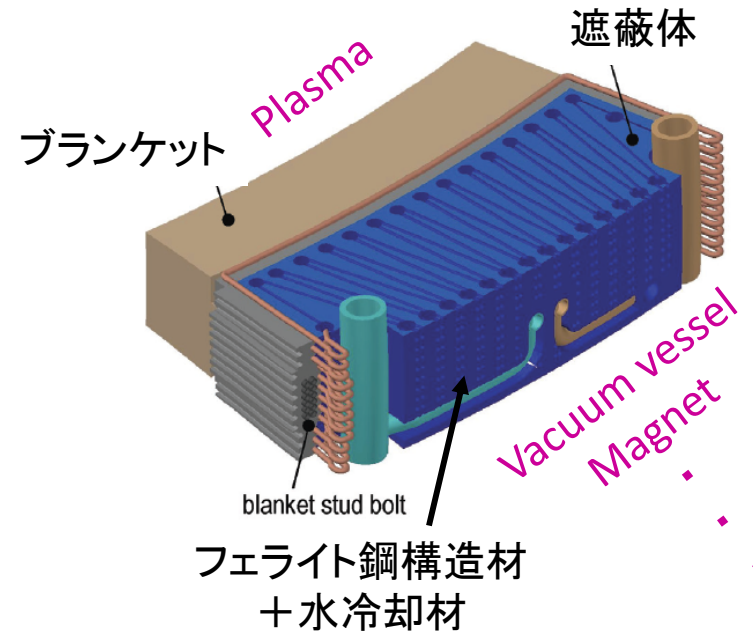
中性子遮蔽材
・FS+水
・FS+ B_4C
・WC
・ ZrH_2 etc.



SlimCS / JAEA Tokamak



SlimCS*



SlimCSのトリチウム増殖
ブランケットと高温遮蔽体*

Table 1
Design parameters of SlimCS.

Major radius, R_p	5.5 m
Minor radius, a	2.1 m
Aspect ratio, A	2.6
Plasma current, I_p	16.7 MA
On-axis magnetic field, B_T	6.0 T
Maximum field, B_{max}	16.4 T
Elongation, κ_{95}	2.0
Plasma volume, V_p	941 m ³
Temperature, T_e	17.0 keV
Density, n_e	$1.15 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Normalized beta, β_N	4.3
Fusion output, P_{fus}	2.95 GW
Neutron wall load, P_n	$\sim 3 \text{ MW/m}^2$

* K. Tobita, et al., Search for reality of solid breeder blanket for DEMO, Fusion Eng. Des. (2010).

SlimCS / 固体ブランケット設計例

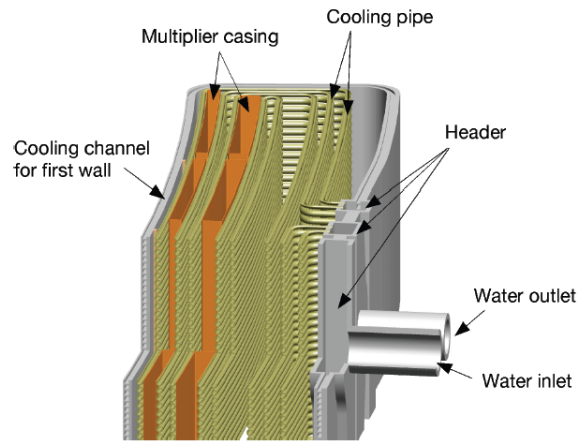


図 6.10 ブランケット内部の概念図*

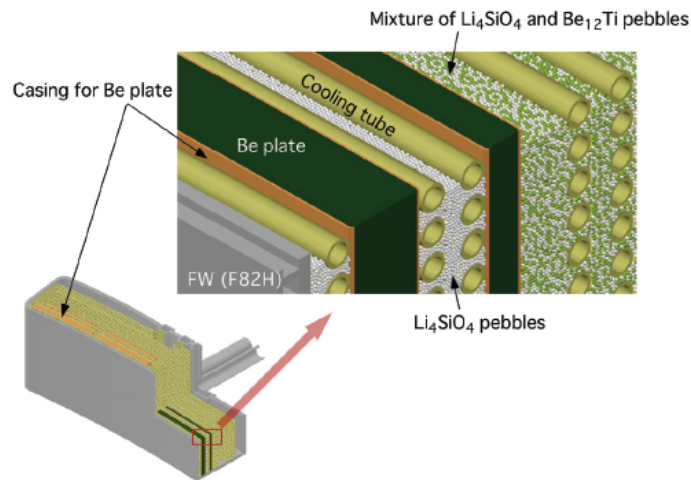


図 6.12 SlimCS のブランケット内部構成の概念図*

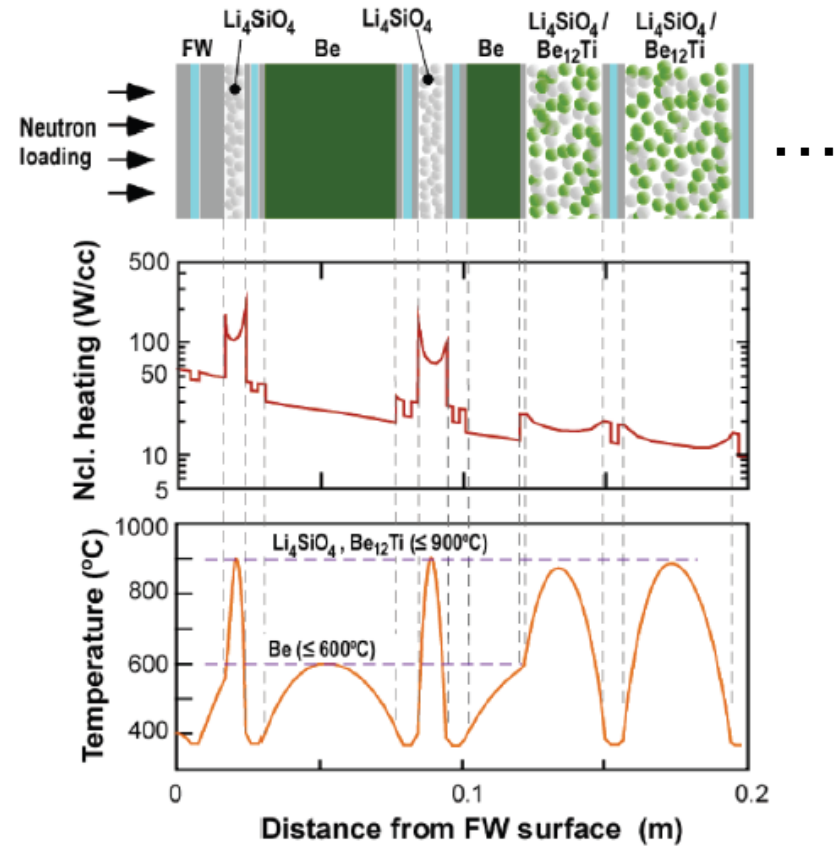
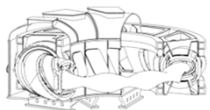


図 6.13 核熱連成解析のモデルおよび計算例*
(中性子壁負荷5MW/m²)

SlimCSでは増殖層8層目まで、
44.3cm厚。



液体ブランケット開発

- ・ より高温での高効率発電
- ・ 構造の簡素化
- ・ 長寿命化、メンテナンスフリー目指せる。
- ・ ${}^6\text{Li}$ 濃縮無し、目指せる(Flibe, Li)。

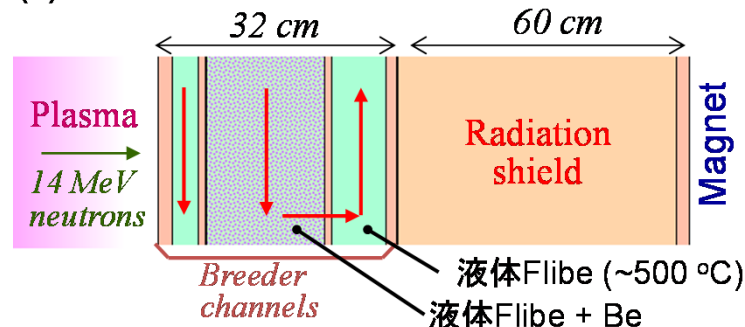
液体ブランケットの例

構造材	トリチウム増殖材	中性子増倍材	冷却材	設計
低放射化フェライト鋼	Flibe	Be	Flibe	FFHR
バナジウム合金	Li	Li	Li	ARIES-RS (US), FFHR
低放射化フェライト鋼 (+ SiC)	Li-Pb	Li-Pb	He	PPCS (EU)
SiC	Li-Pb	Li-Pb	Li-Pb	PPCS (EU), ARIES-ST (US)

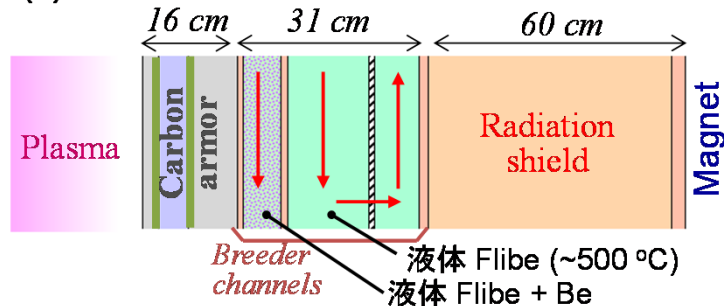
(固体ブランケット)

低放射化フェライト鋼	Li_4SiO_4 , Li_2TiO_3 , Li_2ZrO_3	Be, Be_{12}Ti	水	SlimCS
------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	---	--------

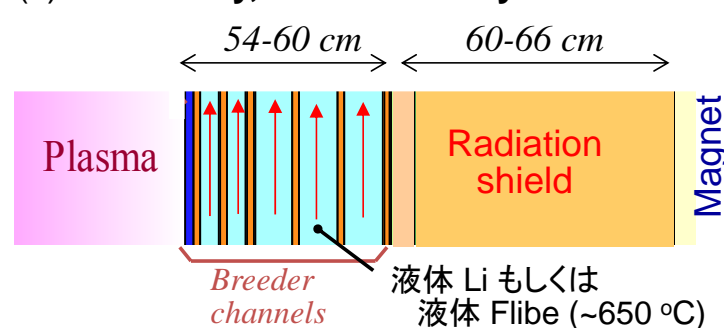
(a) Flibe+Be / JLF-1 (低放射化フェライト鋼)



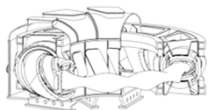
(b) Flibe cooled STB



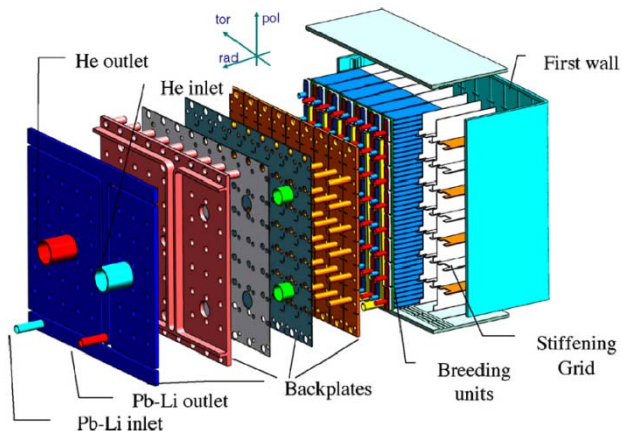
(c) Li / V-alloy, Flibe / V-alloy



FlibeおよびLi冷却ブランケットの構造概略図

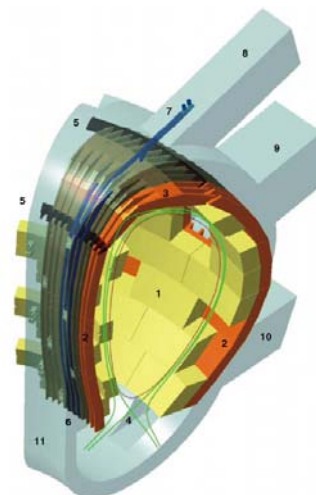


液体ブランケットの構造



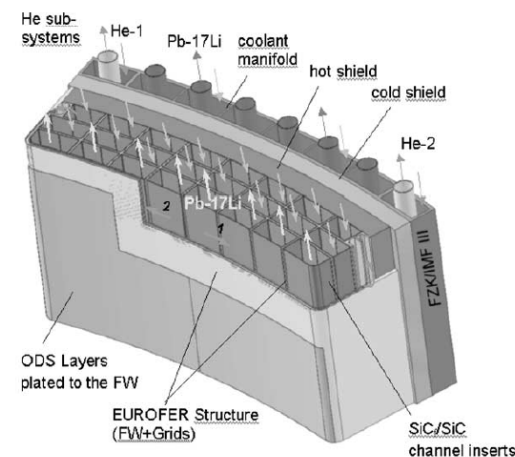
G. Barrera et al., Fusion Engineering and Design 83 (2008) 6–20

EU-DEMO HCLL(LiPb/He冷却)



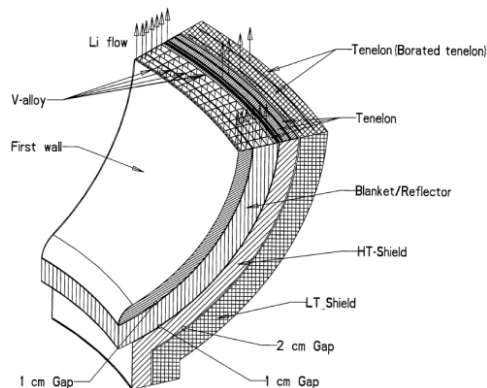
S. Hermsmeyer et al., Fusion Engineering and Design 75–79 (2005) 779–783.

EU-DEMO HCPB モジュール取り付け (個体/He冷却)



P. Norajitra et al., Fusion Engineering and Design 69 (2003) 669–673.

EU-DEMO DCLL (LiPb/He+LiPb冷却)



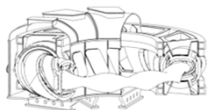
ARIES-RS (Li/自己冷却)

液体ブランケット 構造案の例

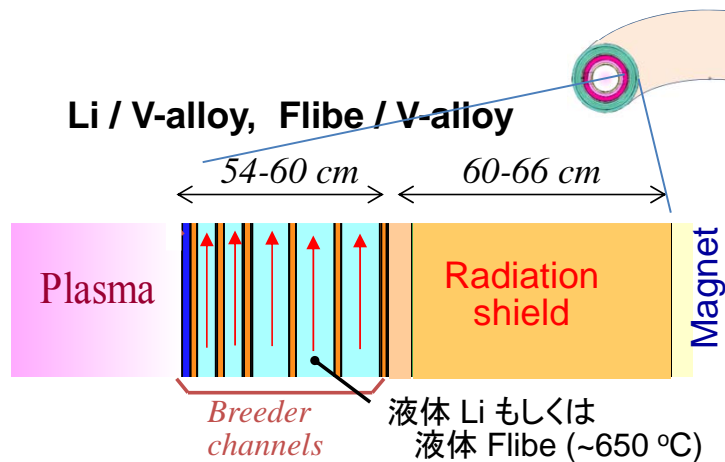


F. Najmabadi et al., Fusion Engineering and Design 80 (2006) 3–23.

ARIES-AT (LiPb/自己冷却)

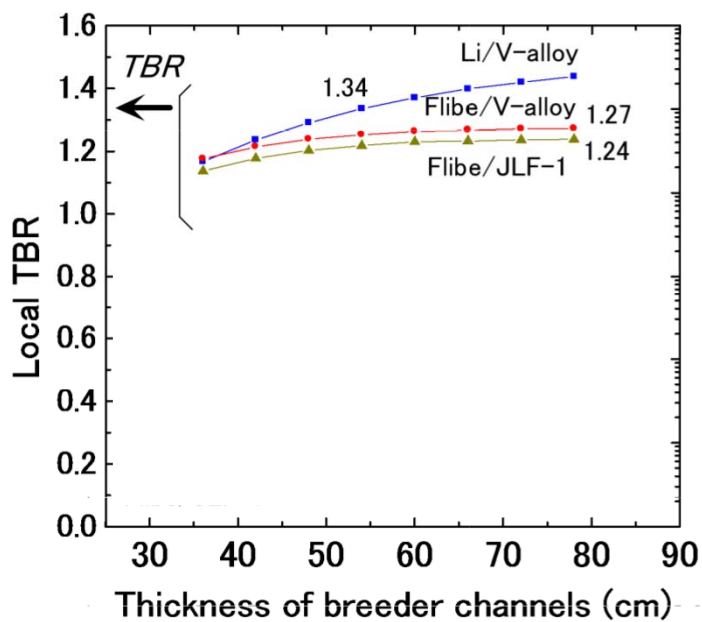
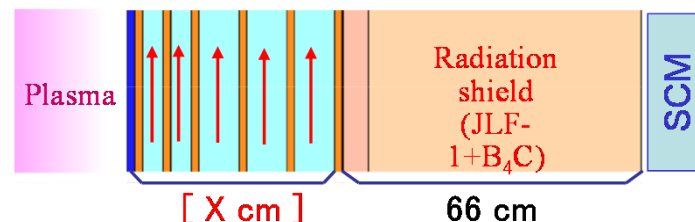


ブランケット厚みとトリチウム増殖比

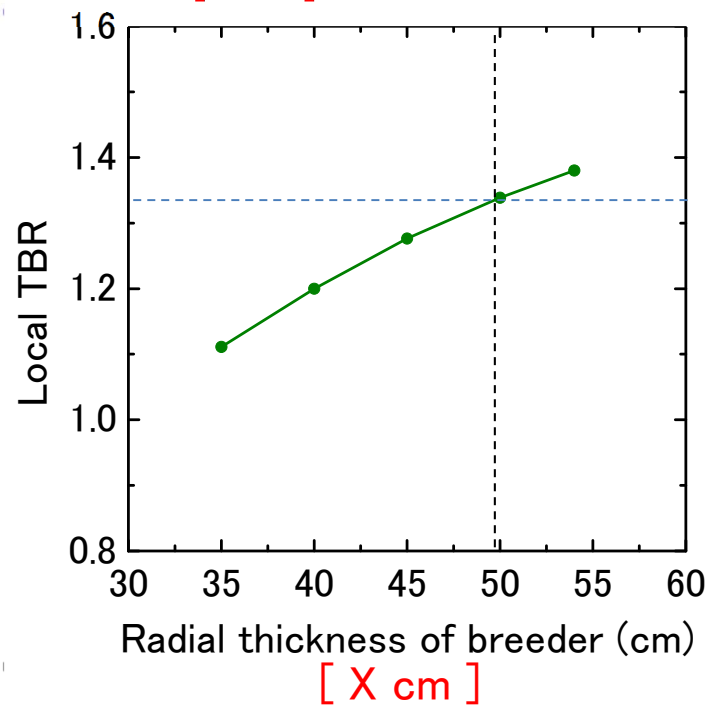


第一段階の検討は
ヘリカルでもトカマクでも同じ。

LiPb



T. Tanaka et al., Fusion Science and Technology 47(2005) 530-534



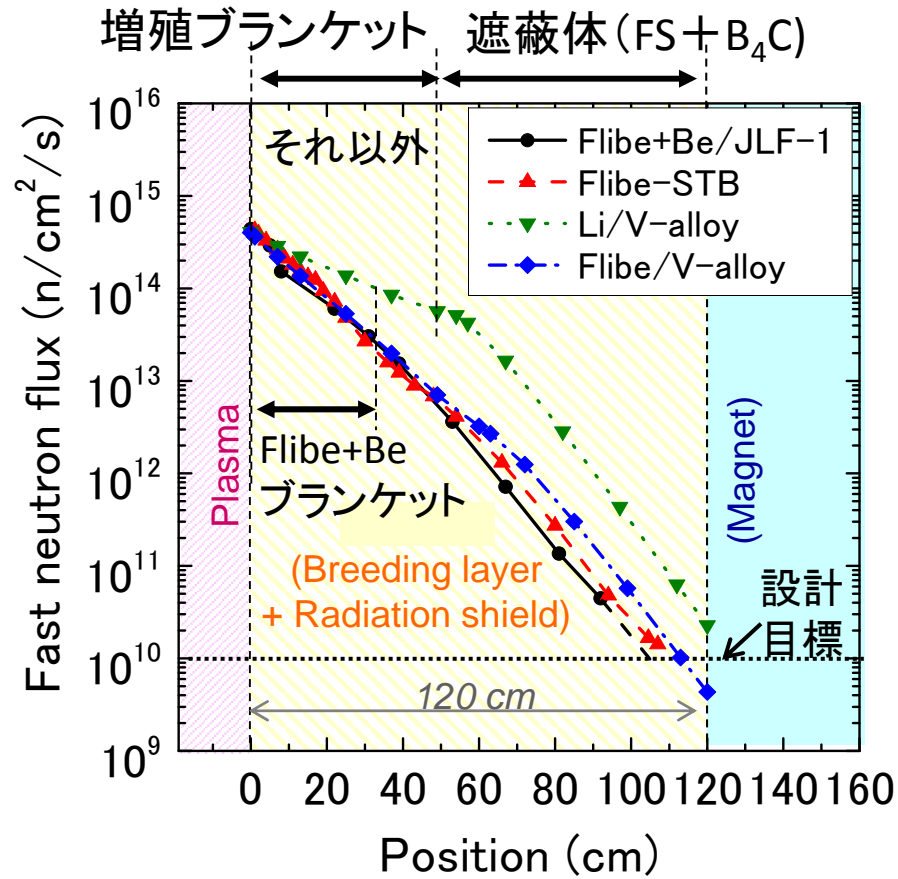
(83Pb-17Li: 85 vol.%, 構造材: 15 vol.%)

増殖層厚みと局所TBR (Tritium Breeding Ratio) の関係の例

ブランケット設計例

	固体 / 水	固体/ He	Li-Pb/ 水	Li-Pb / He	Li-Pb / 二重冷却	Li-Pb / 自己冷却	Flibe/自 己冷却	Li/自己 冷却
T増倍材 ⁶ Li濃縮	Li ₂ TiO ₃ , Li ₄ SiO ₄ , Li ₂ ZrO ₃ 90%	Li ₂ TiO ₃ Li ₄ SiO ₄ 30-60%	Li-Pb 90%	Li-Pb 90%	Li-Pb 90%	Li-Pb 90%	Flibe 天然- 40%	Li 天然- 35%
固体増 倍材	Be, Be ₁₂ Ti	Be	なし	なし	なし	なし	Be	なし
構造材	FS	FS	FS	FS	FS/SiC	SiC	FS	V合金
温度(°C)	290-360	250-500	-325	300-500	460-700	650-1100	400-550	330-610
発電効率	~35 %	~40 %	~33 %	43.7 %	44 %	58.5 %	~38 %	46 %
冷却材 圧力、 流速	25 MPa 5.3 m/s	8 MPa	15.5MPa (水)	8 MPa	8 MPa 40 m/s (He,FW)	1 MPa 4.2 m/s (FW)	1.5 MPa 1.5 m/s (FW)	1 MPa 0.41m/s (FW)
共存性 (腐食)	×	○(△)	×	×	×	○	○ 但しTF	△
安全性	破断放出	-	破断放出	Pb,耐震	Pb,耐震	Pb, 耐震	Be, フッ化物	発火性
構造	複雑	複雑	複雑	複雑	やや複雑	単純	やや単純	単純
厚み(cm) IB/OB	35/45	41/51	55/85	65/95* *マニホールド含む?	51/86	35/75	32 **FFHR2	20/50 56**

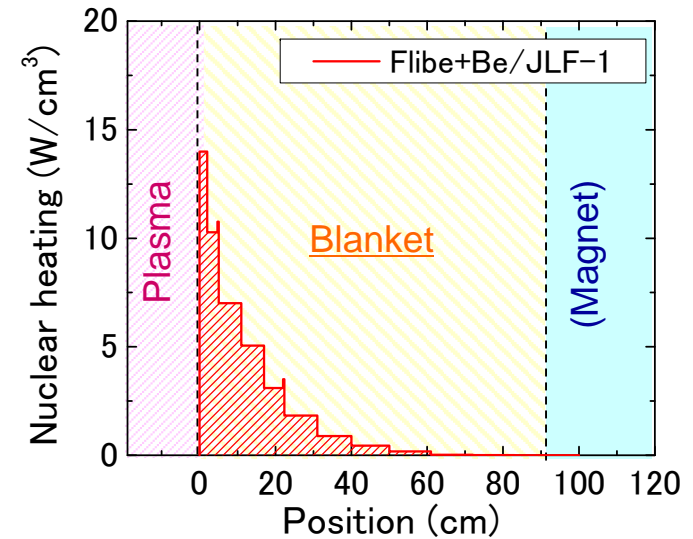
液体ブランケットのニュートロニクス環境



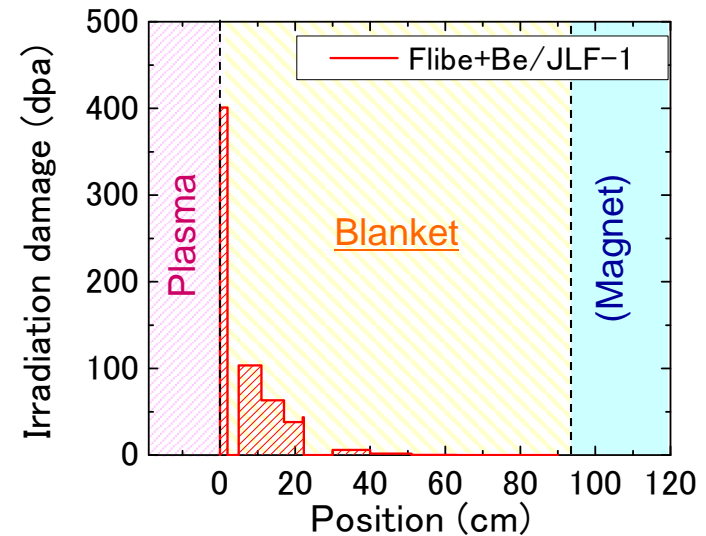
ブランケット内の
高速中性子束 (>0.1MeV) 分布

■ 高速中性子遮蔽のためには、
ブランケット空間が100-120 cm必要

T. Tanaka, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 5, (2008) Pages 120-123.

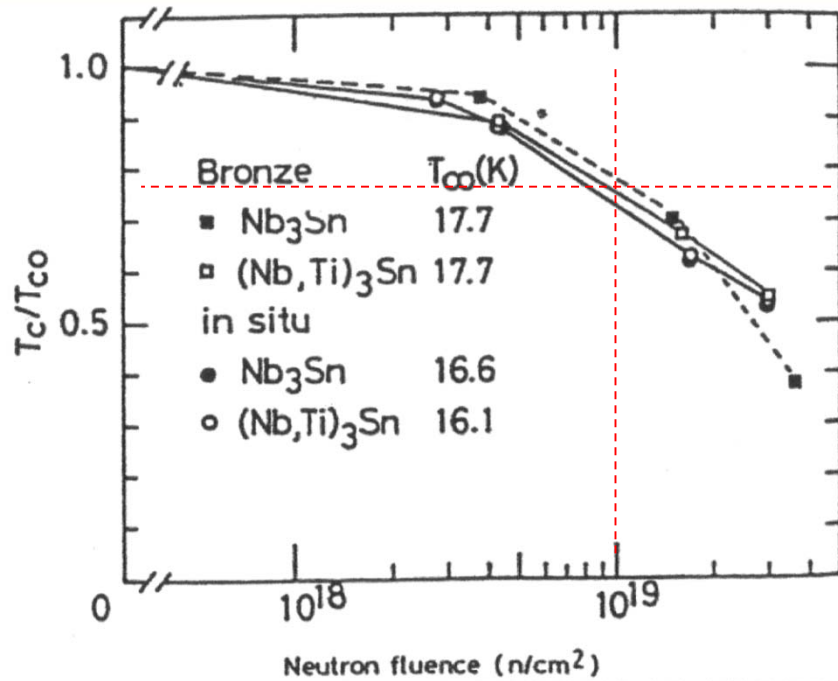


中性子、γ線による核発熱分布
(中性子壁負荷1.5MW/m²)



材料の中性子損傷量
(中性子壁負荷1.5MW/m²、30年運転) 10/17

遮蔽に関する設計目標値の例



金属線材の T_c のフルエンス依存*

超伝導線材、約30年運転として、
高速中性子 (>0.1MeV)
: $<1.0 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
(EU設計例: $1.0 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$)

マグネット核発熱
: $<0. \text{数} - 1 \text{ mW/cm}^3$

再溶接部、
核変換He
: $<1 \text{ appm}$

マグネット
有機絶縁材
: $< \sim 10 \text{ MGy}$

* T. Okada *et al.*, Proceedings of the 6th Japan-US workshop on high-field superconducting materials and standard procedures for high-field superconducting materials testing

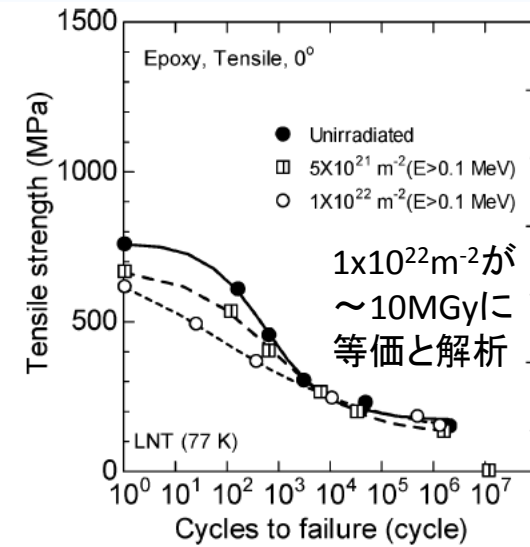


図9 Kapton-H foil/R-glass/Epoxy DGEBA resin (MY 745) の疲労強度.**

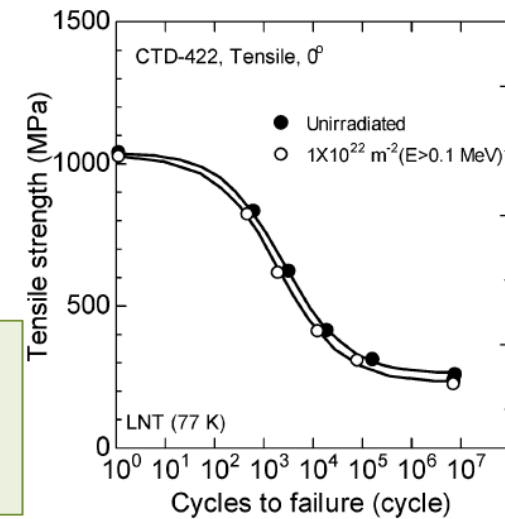
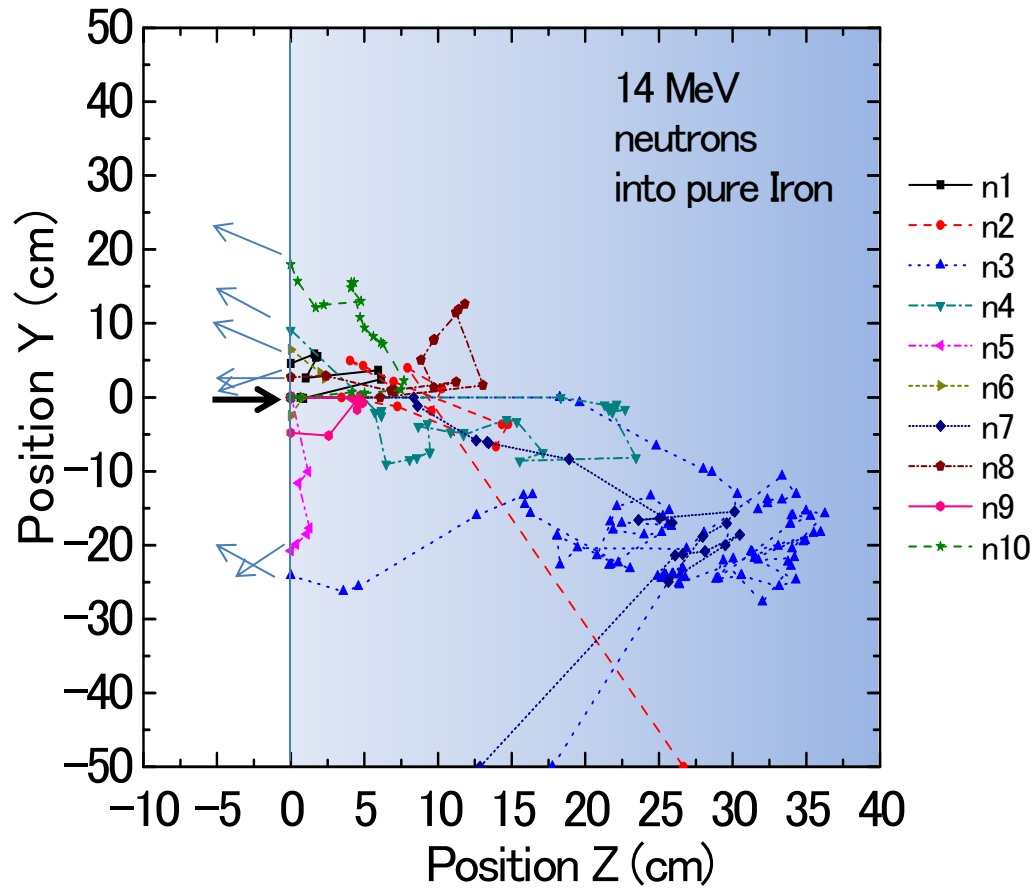


図10 Cyanate ester/epoxy blend resin, S-2 glass (Vf=50%)の疲労強度.**

・材料開発研究の進展とともに、変化する可能性

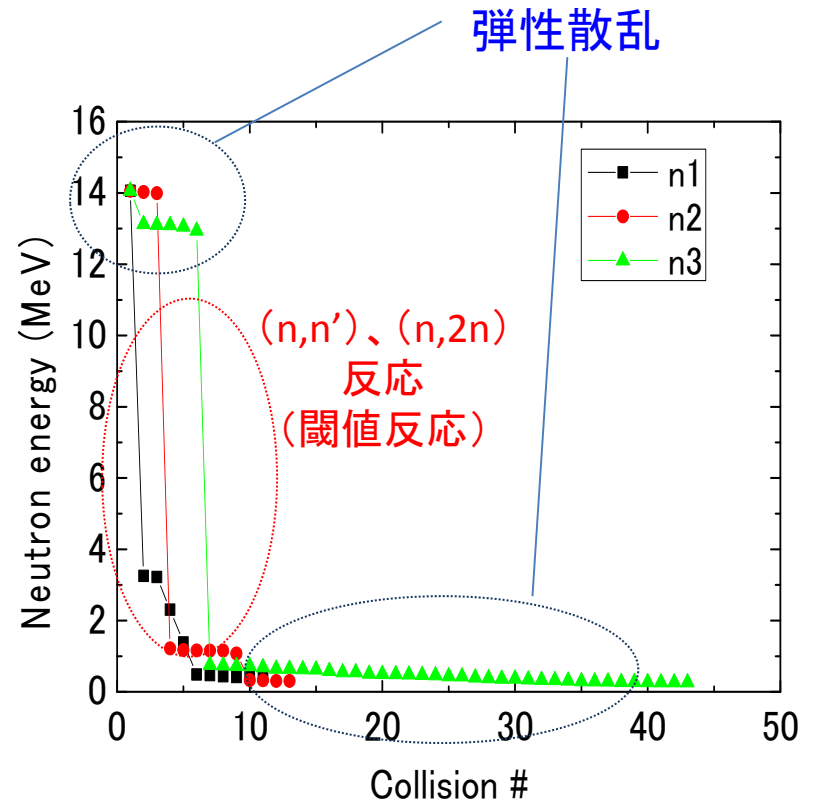
材料中における中性子輸送



鉄中における中性子輸送の軌跡

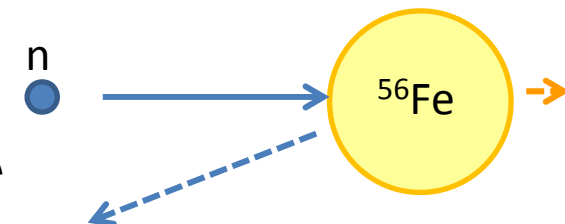
- 中性子10個の軌跡をプロット。
- 半分程度入射面に戻っている。

・鉄との弾性散乱によるエネルギー減衰は小さい

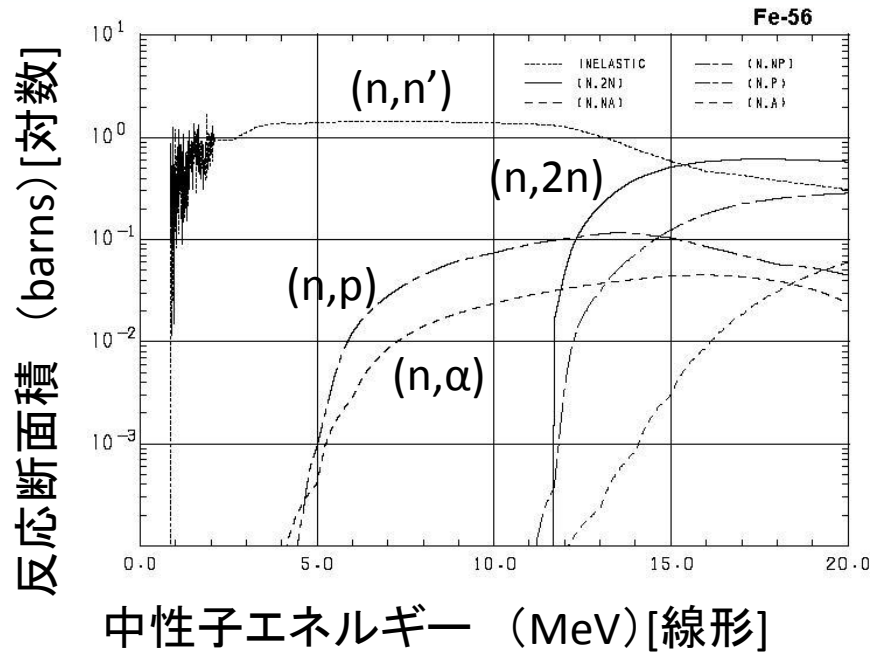


鉄中における中性子エネルギーの減衰

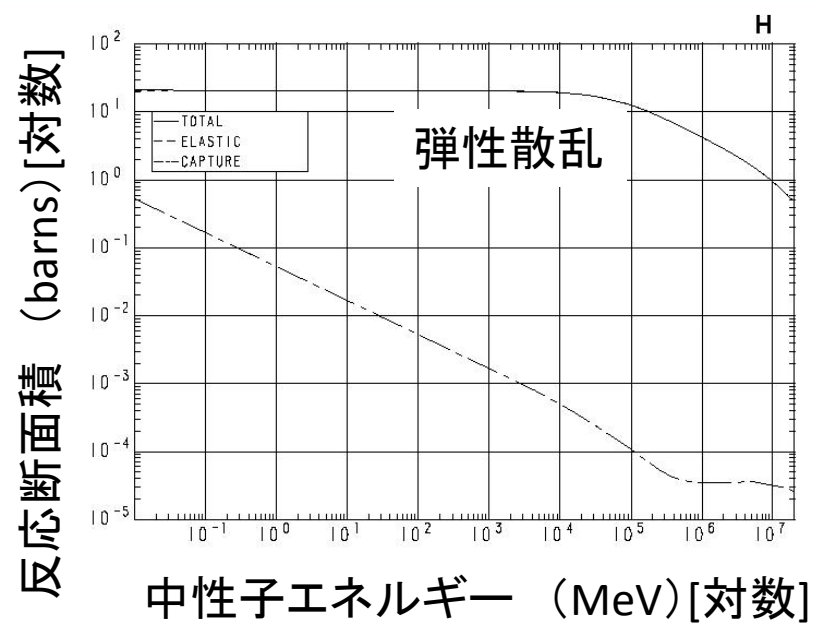
Q値: (n, 2n) : -11.2MeV
(n, n') : -0.85 ~ -4.7MeV



鉄+水による中性子遮蔽



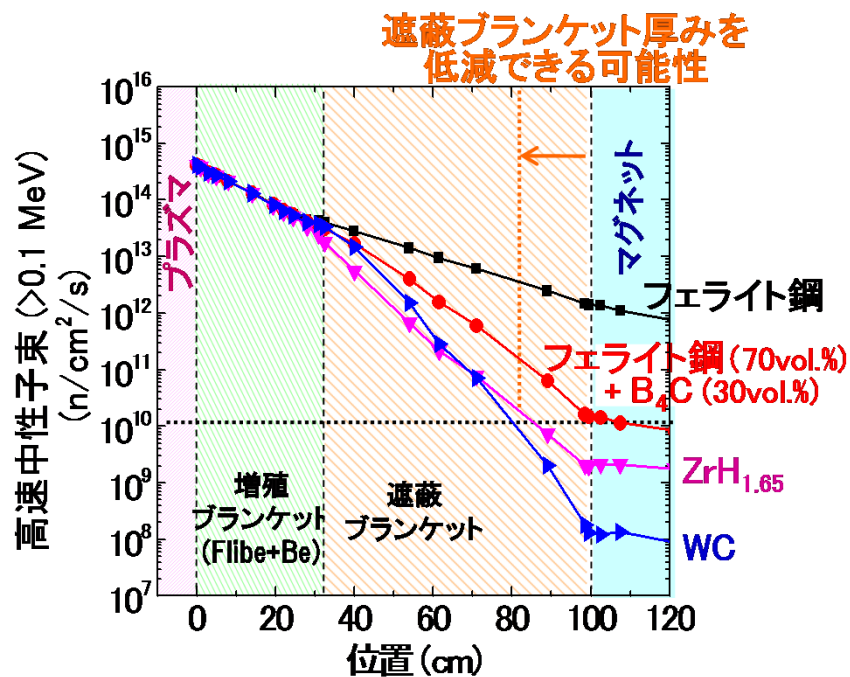
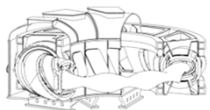
・閾値反応では1回の反応でのエネルギー減衰は大きい。
ただし、~1MeV以上のみ。



・水素との弾性散乱によるエネルギー減衰は大きい。
ただし、1MeV以上で断面積、小。

→ 鉄(高エネルギー側) + 水(低エネルギー側) による効率的な遮蔽





FFHRブランケットにおける
中性子遮蔽材料の性能比較

遮蔽バルク材料の重量密度

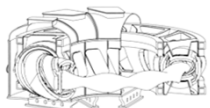
	試料写真 (いずれも 10mmφ)	入手材量の 密度(g/cm³)	文献・データ ベースの密度 (g/cm³)
WC		15.7	15.5-15.7
B₄C (天然B, B-10濃縮)		2.50	2.52
ZrH₂		5.03 (常温・ 粉末プレス・ 1200MPa)	5.56

遮蔽ブランケットの置かれる中性子環境検討

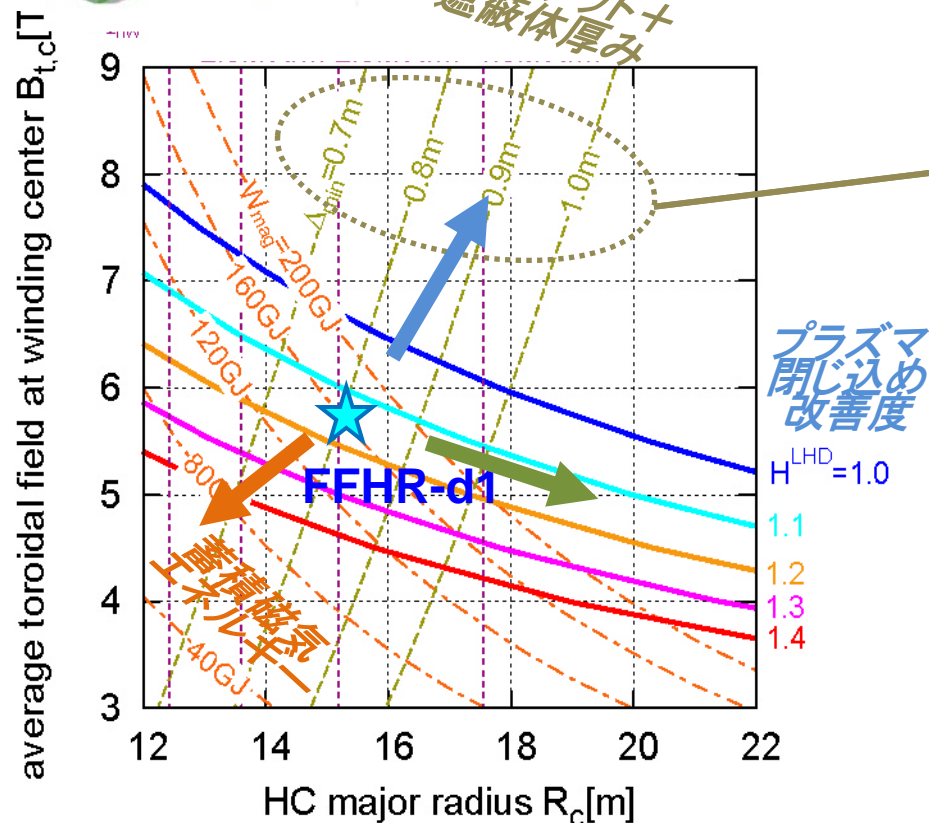
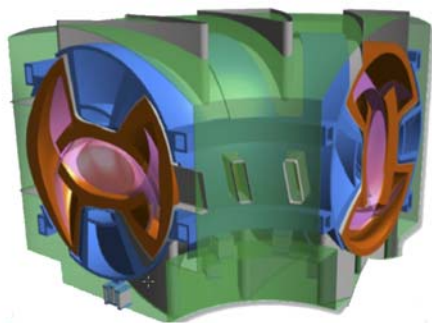
- ✓ インボード側-WC: ~6W/cm³, ~70 dpa/30年*
- アウトボード側-B₄C: ~2.5W/cm³,
~35 dpa/30年*

*FFHR-d1設計の場合、データライブラリfusion40-dpaを使用

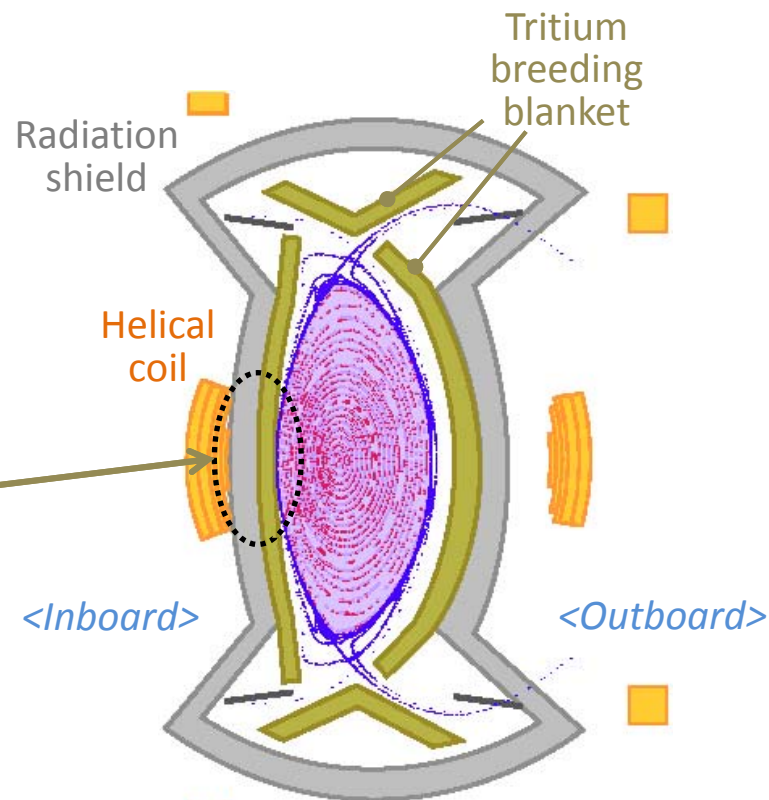
- 材料データの取得を行うとともに、使用場所、使用形態および除熱設計の検討を進めている。



炉の基本パラメーター設定への影響

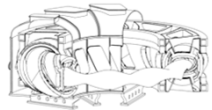


FFHR-d1におけるデザインウィンドウ検討例
(T. Goto et al., to be published in PFR.)

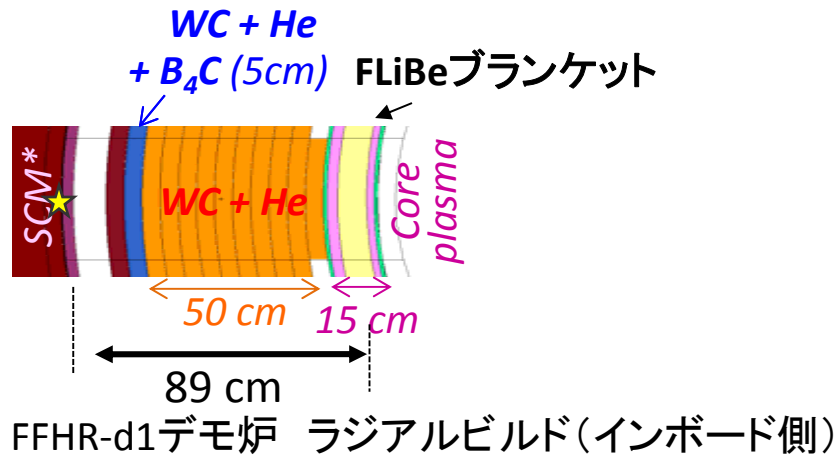
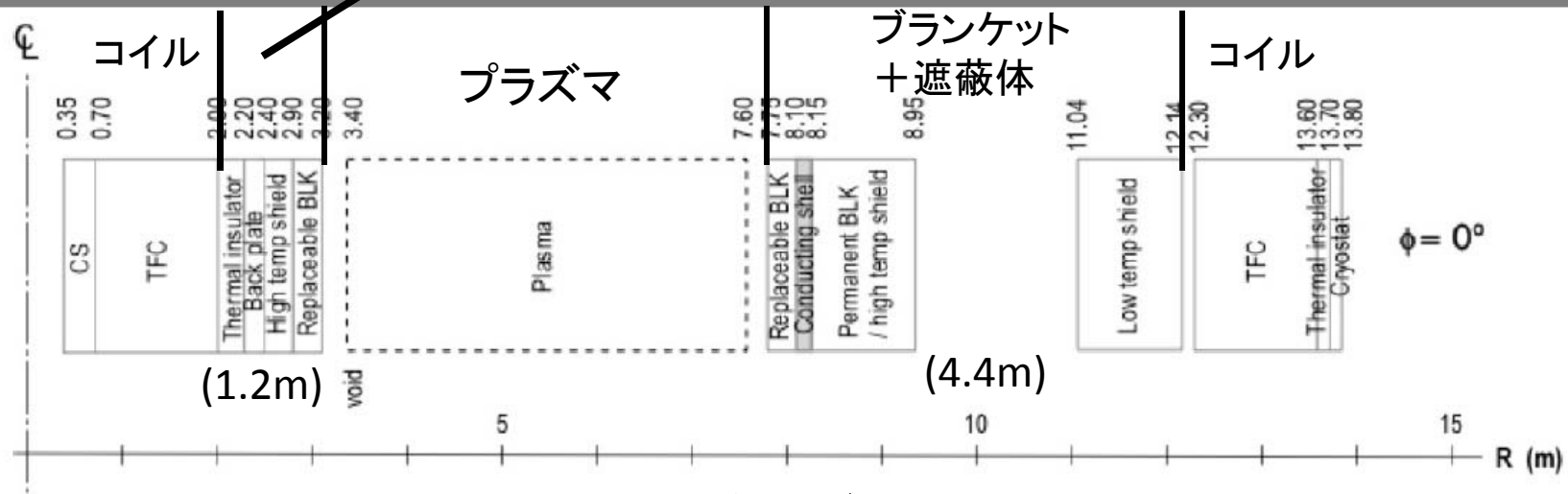


ヘリカル炉FFHR-d1における磁力線分布

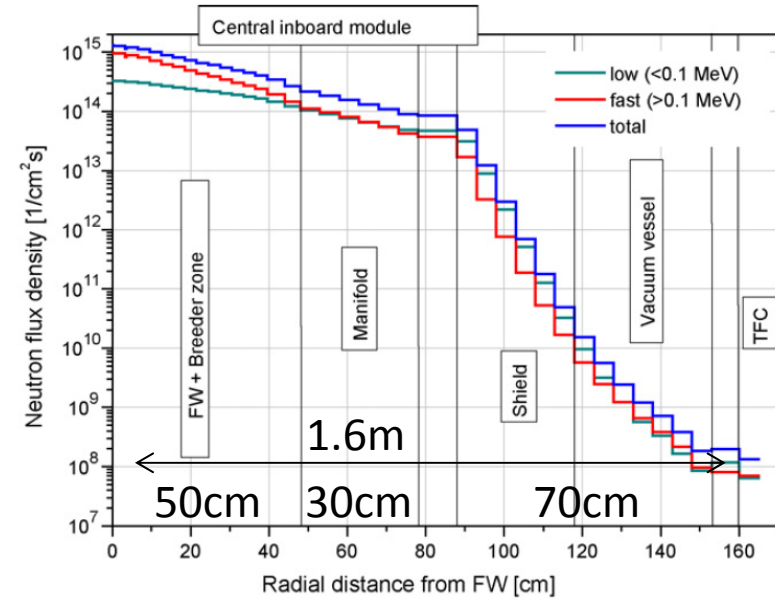
- ・ブランケット+遮蔽体厚み、蓄積磁気エネルギー、閉じ込め改善度の望ましい方向が相反する。
- 炉の大きさ等の主要炉設計パラメーターを決める要因となる。



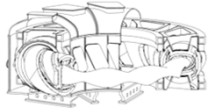
まとめ
ブランケット
+ 遮蔽体



- ・アウトボード側は、
ブランケット+遮蔽体1.2m以上
- ・ヘリカル発電炉(FFHR2等)では、
インボード、アウトボードとも1.2m以上確保



EU DEMO炉 ラジアルビルド(インボード側)



- ・増殖ブランケット 50–60cm、遮蔽体 50–60cm
(トカマクでは真空容器(鉄+水)も遮蔽機能をもつ)
さらに、冷却材配管分岐(マニフォールド)、ブランケット-遮蔽体間ギャップ
真空容器、熱シールド、コイルとのギャップ を考えると
最低でも1.2mはほしい。
ブランケット選択、コンポーネント設計の幅、尤度を
持たせる観点からも、より広い空間を。
- ・設計によっては、インボード側のスペースがこれより小さい。
→アウトボード側のスペースに余裕があれば、
そちらに厚めのブランケットを置いて、TBR確保等を目指す
設計要素がぎりぎりのせめぎあいになることが多い。
- ・ブランケットタイプや遮蔽体材料の選択によっては、
より狭いブランケット+遮蔽体空間を目指せる可能性があるが、
現状では、採用のためにさらなる材料・システム研究が求められる。