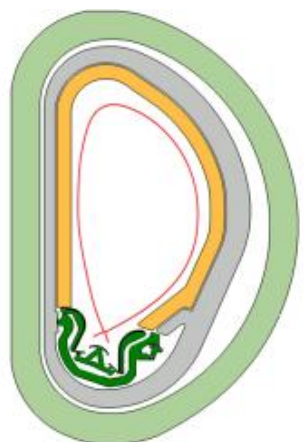


QSTにおける核融合中性子源の検討

量子科学技術研究開発機構 (QST)

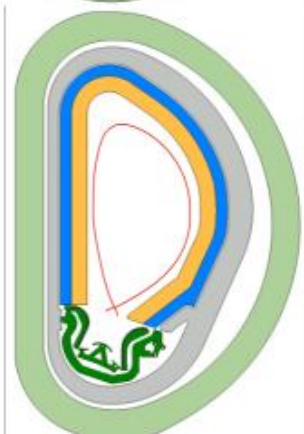
落合 謙太郎

令和7年度第1回ITER/BA/原型炉 科学技術意見交換会資料
「ITERサイズ原型炉」より



发电ブランケット
(厚さ: 0.45m)

プラズマ体積: ITERと同じ
(831m³)



増殖領域 (厚さ: 0.5m)
遮蔽領域 (厚さ: 0.35m)

プラズマ断面: ITERより小

DT中性子出力 1GW (最大) 3.6×10^{20} n/s
対向壁表面フラックス 5.0×10^{14} n/cm²/s

- DONES材料照射プログラムに正式参加
- 原型炉計画に整合した低放射化フェライト鋼F82Hの微小試験片照射データ (20dpaまで) を取得を決定
- DONESは微小試験片照射のみ、炉内機器の検証は未定
- NBLに基づきITERの本格DT運転は2040年以降
- ITERサイズ原型炉の計画に合わせた炉内機器の機能性検証は未定

QST内での検討結果

中性子源によるブランケット、ダイバータ・リミター、遮蔽、制御・計測機器の炉内機器の性能検証が**早期に必要**

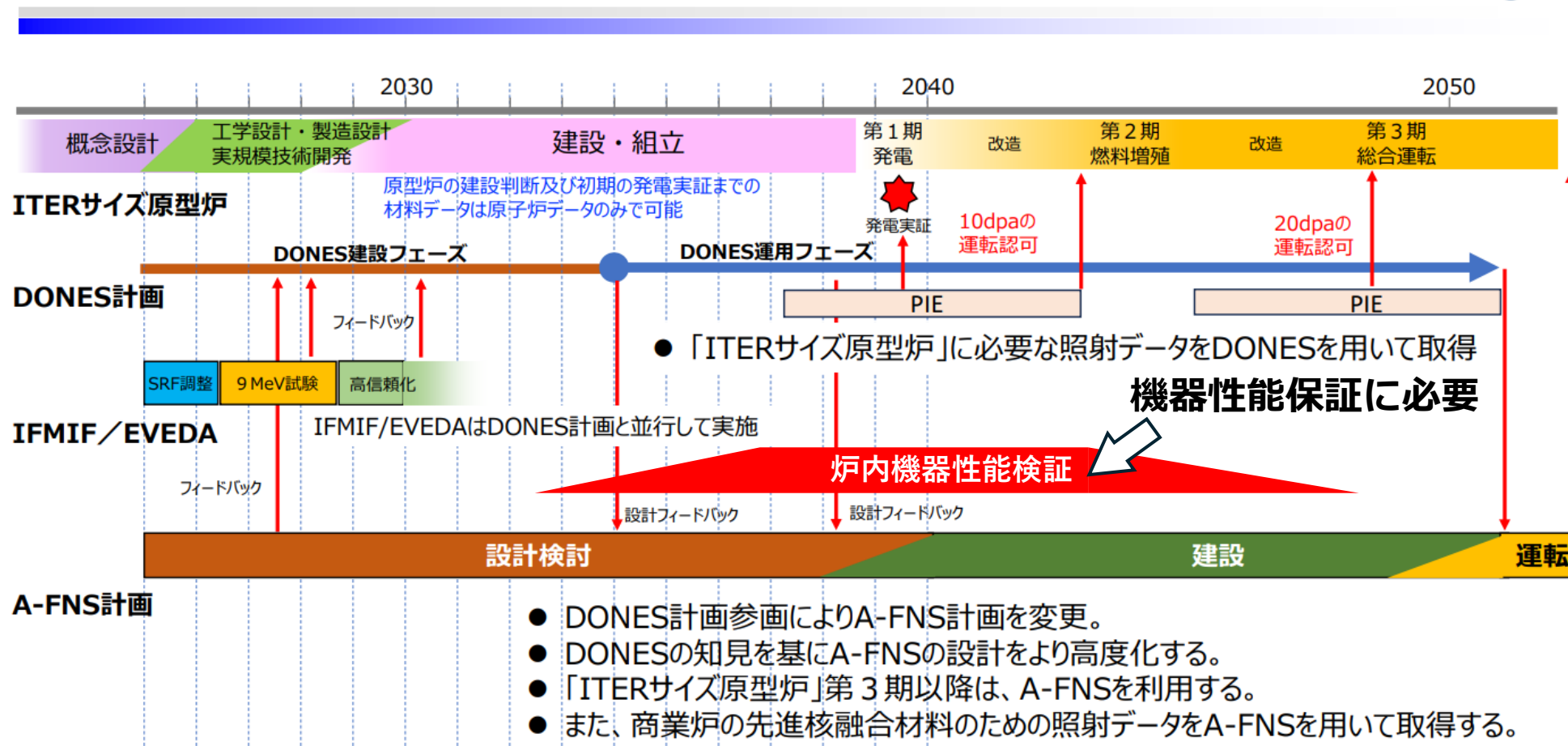


材料照射試験はDONESに集約

DEMO炉の炉内機器体系 (システム) 性能検証用中性子源 (原型炉用中性子源) が2030年代に必要

令和7年度第1回ITER/BA/原型炉 科学技術意見交換会資料
「核融合炉材料中性子照射試験計画（DONES計画）」より

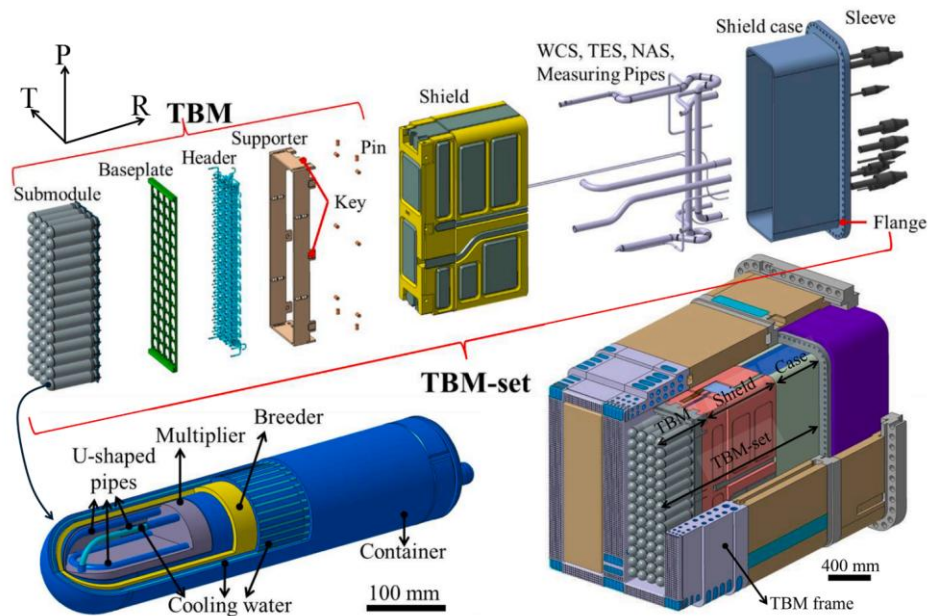
DONES計画を含めた照射試験スケジュール



核発熱の検証までは 10^{14} オーダーの中性子フラックスが必要 (DONESの約1/10の発生率)

検証項目 (QST案)		中性子源の仕様
ブランケットシステム	トリチウム増殖性能	T生成率= 1 Bq/g/s (nフラックス 10^8 n/cm ² /sec以上)
	トリチウム回収性能	回収率= 100 Bq/g/s/cc (nフラックス 10^{10} n/cm ² /sec以上)
	トリチウムモニター	回収率= 100 Bq/g/s/cc (nフラックス 10^{10} n/cm ² /sec以上)
	核発熱 (熱回収) 性能	発熱率 1 W/g以上 (nフラックス 10^{14} n/cm ² /sec以上)
	照射による回収性能への影響	発熱率 1 W/g以上 (nフラックス 10^{14} n/cm ² /sec以上)
遮蔽システム	遮蔽能力	~1mSy/h (nフラックス 10^{13} n/cm ² /sec以上)
	コイル除熱性能	~0.1 W/g 以上 (nフラックス 10^{13} n/cm ² /sec以上)
ダイバータシステム	照射による除熱性能への影響	発熱率 1 W/g以上 (nフラックス 10^{14} n/cm ² /sec以上)
	核発熱評価	発熱率 1 W/g以上 (nフラックス 10^{14} n/cm ² /sec以上)
プラズマ計測機器	機能劣化評価 (寿命) 電子密度、不純物密度、中性子発生率 等	1 - 1000 kGy/h

今後、具体的な体系条件による感度解析と測定手法の検討を実施予定 (仕様の詳細化)



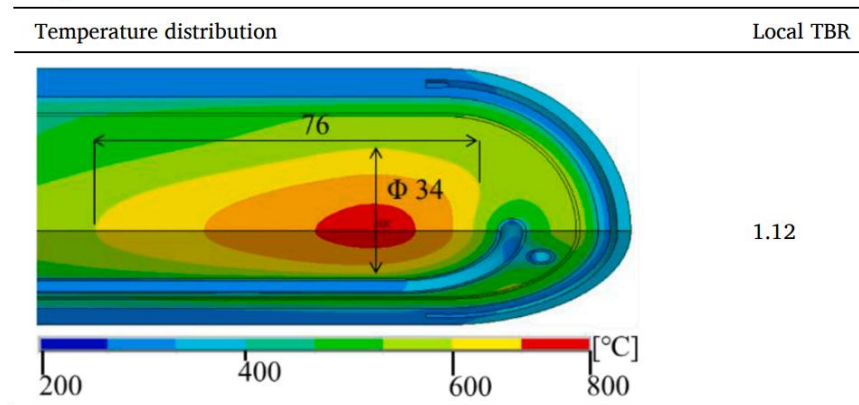
ITER-TBMを例として

プラズマ出力500 MW級
(中性子発生率は約 1.8×10^{20} n/s)

サブモジュールの核発熱量
約1000 W/モジュール

- 核発熱量の評価核データライブラリの信憑性
- 物質の熱伝達率の信憑性
- 非均質構造による局所的な温度勾配
- 空間マージンのない設計

Temperature distribution and local TBR of submodule.



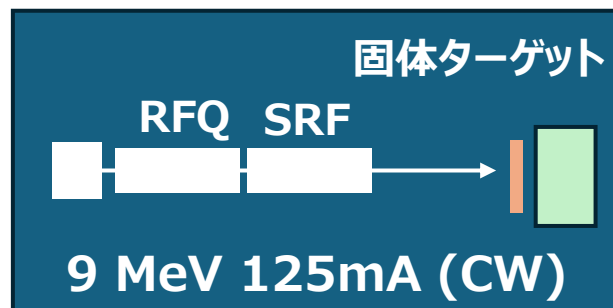
温度勾配が及ぼす材料への応力や物質移行への影響

核発熱も含めたトリチウム生成回収・熱回収性能の検証が必要

W. Guan et al Fusion Engineering and Design 221 (2025) 115393.

LIPAcの利用 現在開発中の加速器（既存施設の活用）

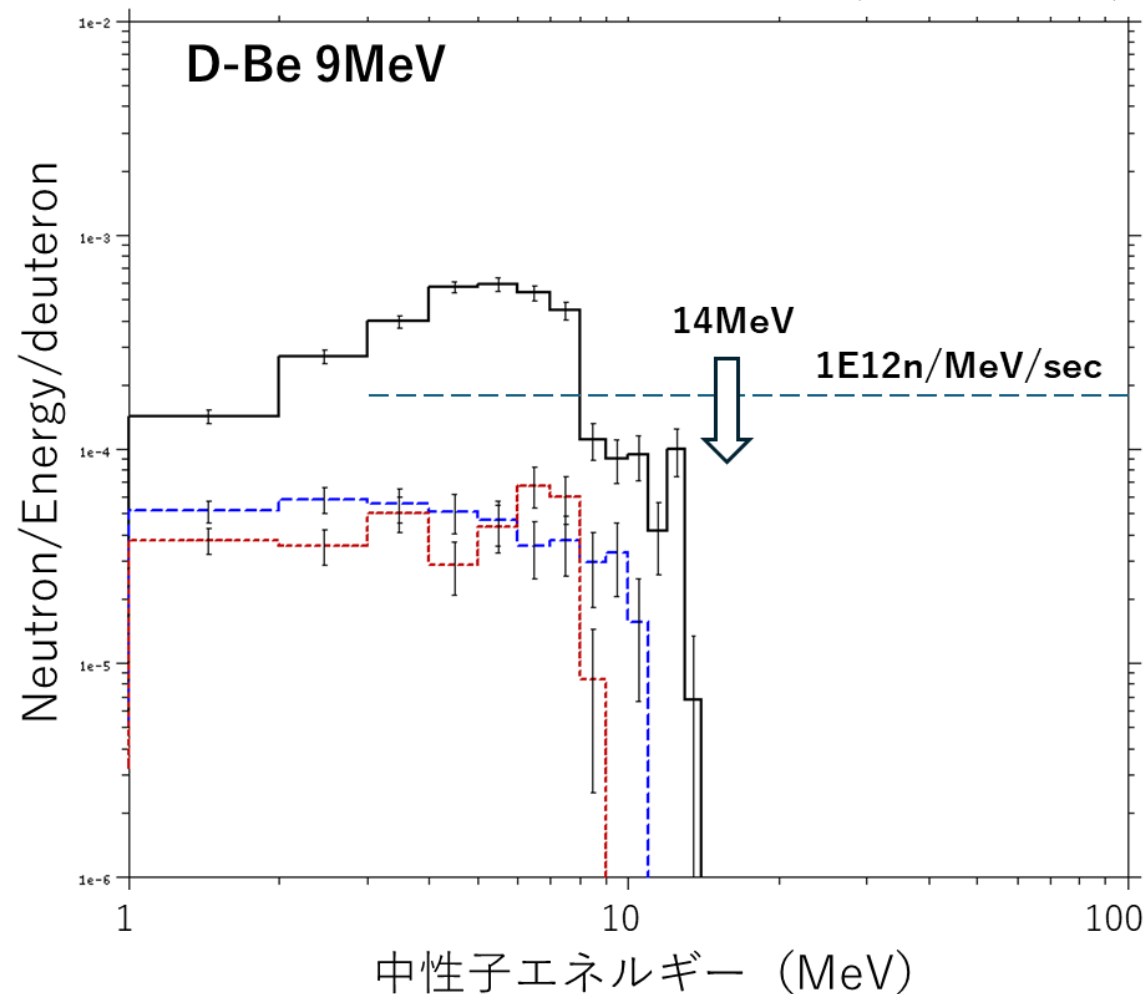
原型炉LIPAc



- 中性子発生率: $3.3E13/s/125mA@Be$
- 中性子平均エネルギー: 4~6MeV (0度)
- ターゲット熱負荷: 1100 kW

トリチウム生成率・回収率は検証可能
核発熱は最大0.1W/gと予測（検証困難）
パルス運転は不適
液体ターゲット利用はSRFクエンチのため不適
IFMIF/EVEDA事業スケジュールとの不整合

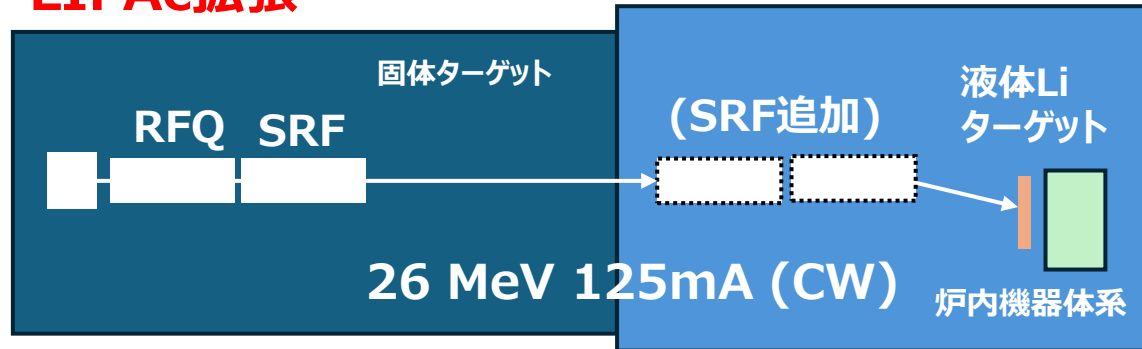
固体ベリリウムターゲット（フルストップ）



LIPAcの利用 既存施設の有効活用

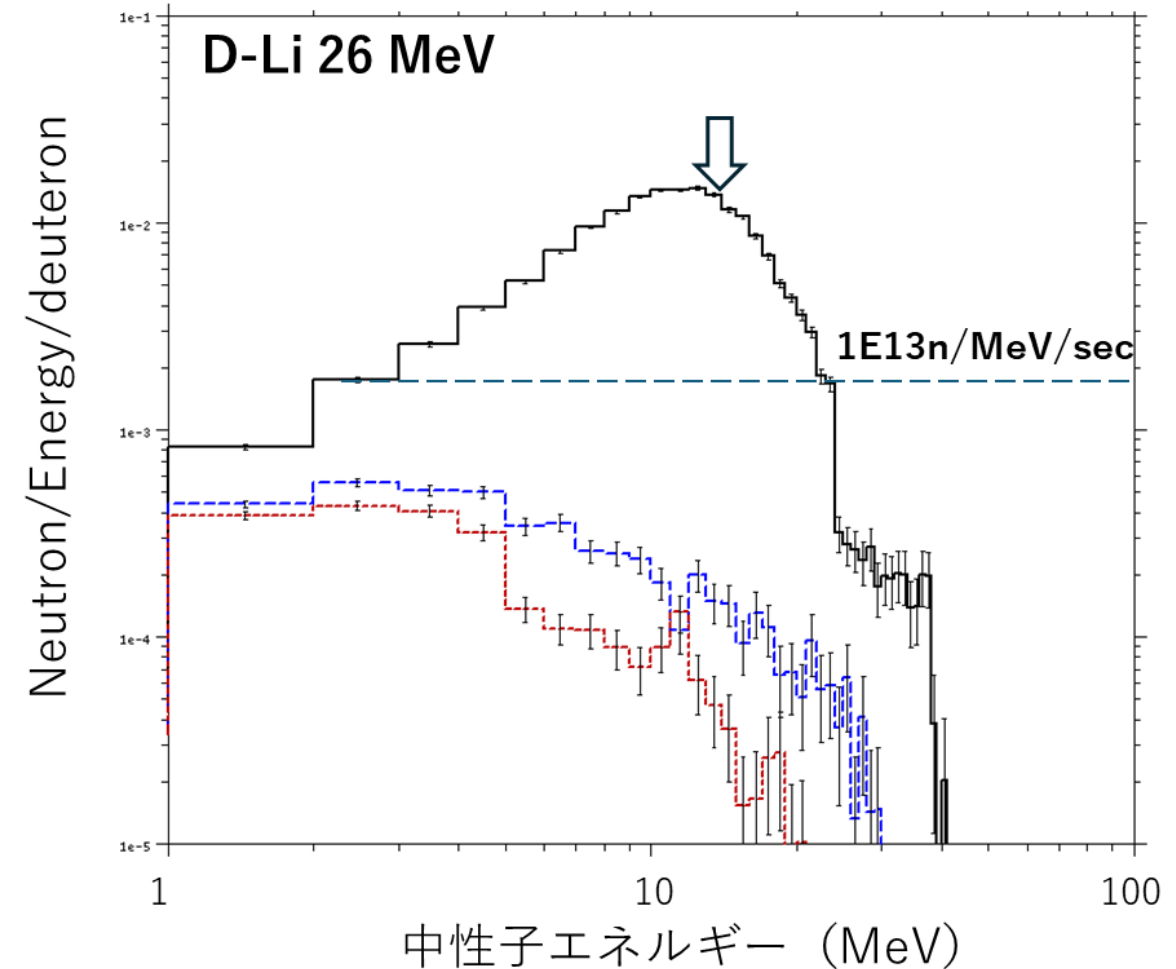
LIPAc拡張

新設 (拡張)

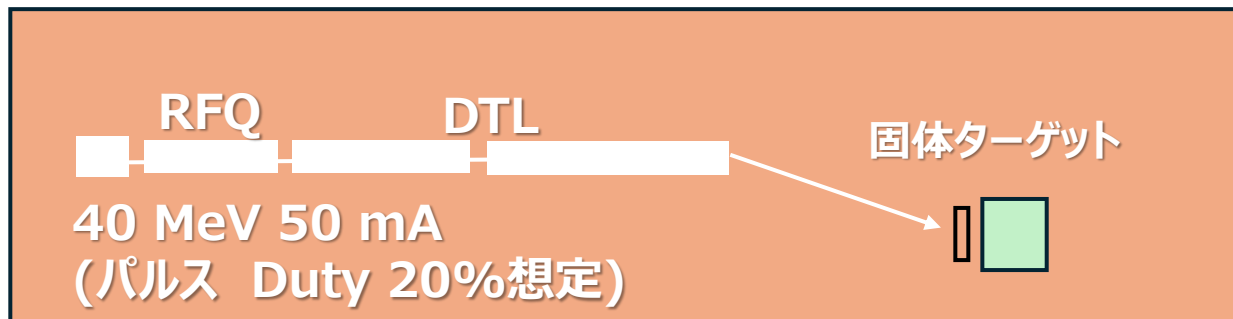


- 中性子発生率: $1E16/s/125mA@Li$
 - 中性子平均エネルギー: 約14MeV (0度)
 - ターゲット熱負荷: 3250 kW
-
- トリチウム生成率・回収率は検証可能
 - 核発熱は最大10W/gと予測 (検証可能)
 - パルス運転は不適
 - 液体リチウムターゲットが必須
 - IFMIF/EVEDA事業スケジュールとの不整合

液体リチウムターゲット (フルストップ)

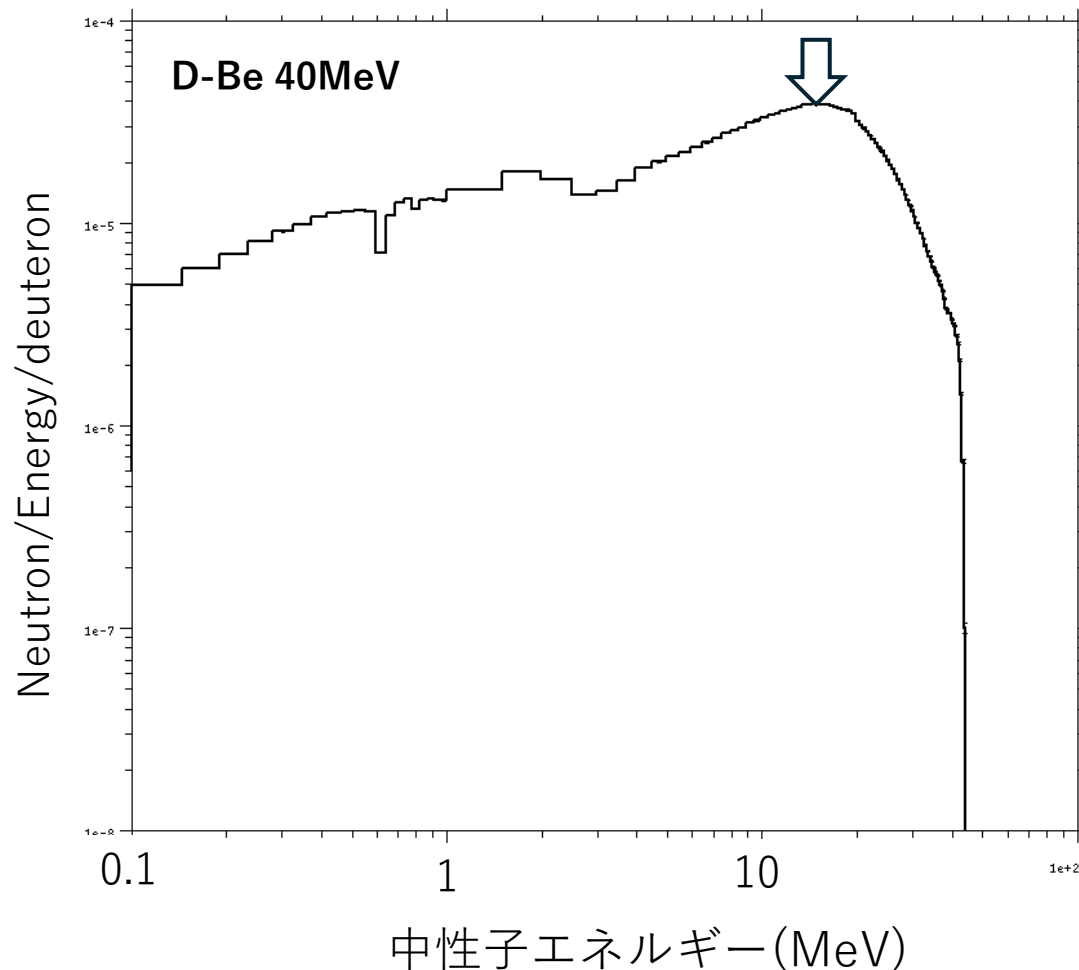


新規中性子源 炉内機器検証用パルス中性子源



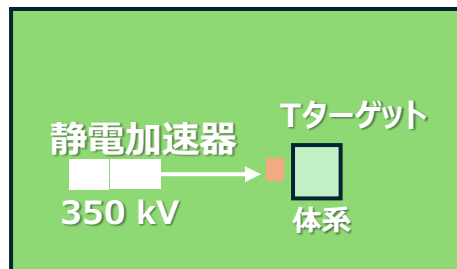
- 中性子発生率: $3.9E15/s/50mA(duty20\%)@Be$
- 中性子平均エネルギー: 約16MeV (0度)
- ターゲット熱負荷: 4000 kW

- トリチウム生成率・回収率は検証可能
- 核発熱は最大3W/gと予測 (検証可能)
- パルス運転
- 既存の加速器技術の導入で開発要素を極力低減
- 固体ターゲットの除熱開発が必要 (平均熱負荷 400W)
- 重陽子エネルギーの最適化検討
- 液体リチウムターゲットも候補として検討
- 原型炉基盤設備の施設として六ヶ所に建屋新設を想定



設計優先度が最も高い原型炉用中性子源と判断

DT中性子源 実績のあるDT中性子源



- 中性子発生率: $1.5E13/s/100mA@TiT$
- 中性子エネルギー: 14.1MeV (単色当方)
- ターゲット熱負荷: 0.35 kW/cm^2
- トリチウム生成率・回収率は検証可能
- 核発熱は $0.1W/g$ 以下と予測 (検証困難)
- 静電加速器によるDC運転
- 加速器の大電流化が課題
- チタン薄膜のトリチウム吸蔵ターゲット (1000Ciオーダー)
- またはトリチウムガスターゲット (1000Ciオーダー)
- 安定したトリチウムターゲットの確保が課題

ターゲットの構造と照射体系の詳細が 週当たり最大100時間の連続運転を想定 (総発生量1.4E21)

Reactor	Fusion Power		Neutron production rate (/s)	Neutron Flux (/cm ² /s)
DEMO (JA)	1 GW(DT)		3.6×10^{20}	5.0×10^{14} @FW
NS-facility	D-Beam	Target		
LIPAc	125mA (CW) 9MeV	Liquid Li	3.3×10^{13}	3.3×10^{12}
Pulsed Neutron	50mA (Pulsed) 40MeV Duty ~ 20%	Solid (Be or C) Liquid Li (Small)	3.9×10^{15} @Be	3.9×10^{14} 体系・照射の最適化
DT-NS	1000 mA (DC) < 0.5MeV	Solid or Gas T	1.5×10^{14}	1.5×10^{13}

中性子発生率とスペクトルの最適化 (解析)

- 加速器の仕様詳細化
- 照射設備の最適化

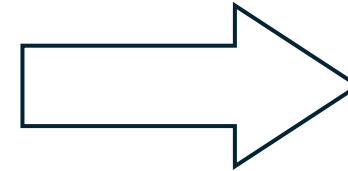
ターゲット仕様の最適化 (解析・R&D)

- ターゲットの仕様詳細化

照射体系の環境検討 (解析)

- エネルギーシフター
- 計測機器の選定
- 照射後ホットラボ施設の仕様

IFMIF中間工学設計
IFMIF/EVEDA実績
A-FNS概念設計を活用

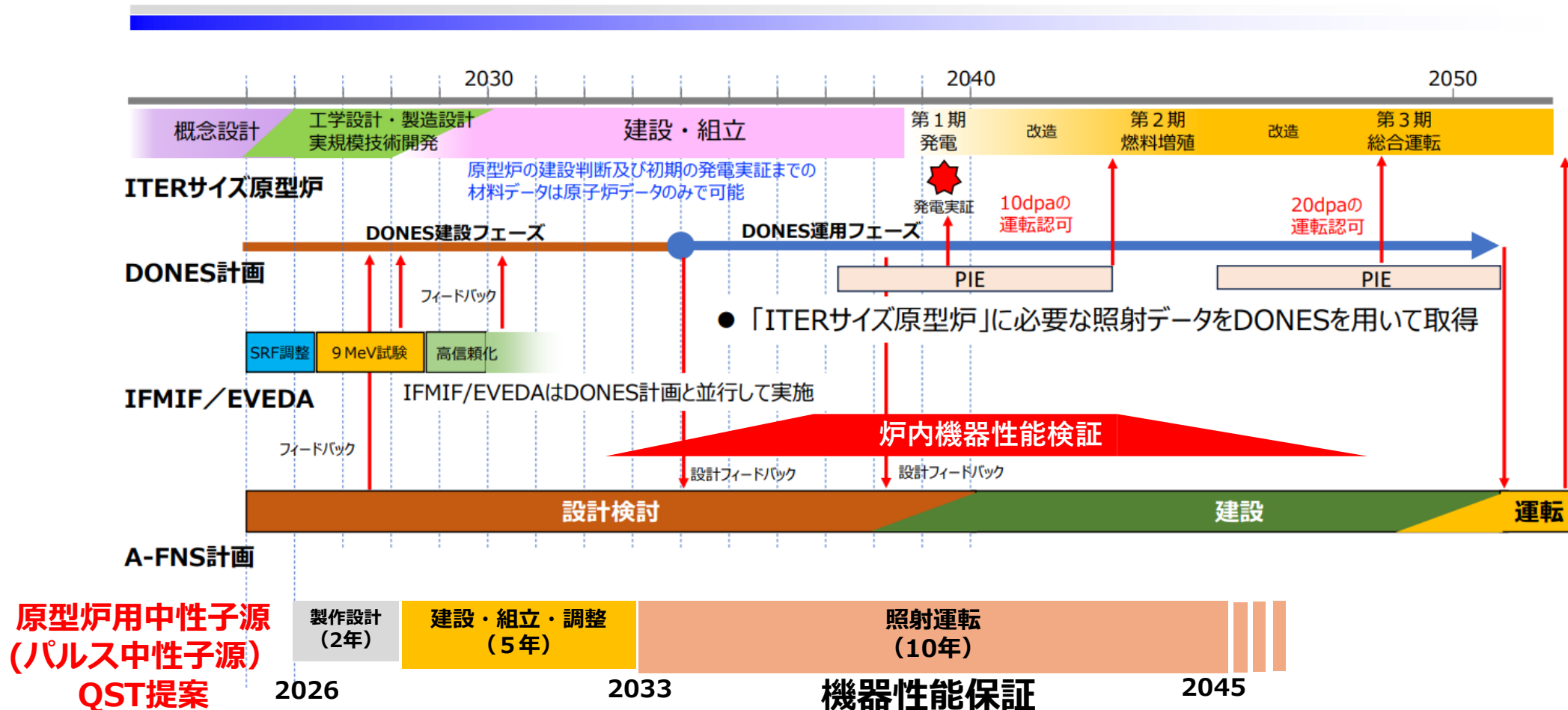


2028年頃に提示

- 照射試験計画案
- 建屋レイアウト
- 必要電力量・給排水量
- 建設・製作工期
- 関連建屋の検討

大学・メーカー等の賛同・協力体制を構築・推進し世界トップの原型炉工学を推進したい。

DONES計画を含めた照射試験スケジュール



- DONES参画、ITER計画、DEMO計画を念頭に、QSTの核融合中性子源について技術検討を実施。
- 材料照射試験はDONESに集約し、炉内機器の機能性に関する中性子源（原型炉用中性子源）が2030年代に必要と判断。
- 特にブランケットの核発熱の影響も含めた機能検証を2030年代後半までに開始可能な中性子源が必要とした。
- いくつかのタイプで原型炉用中性子源を検討し、パルス重陽子ビームによるパルス中性子源が最有力候補と判断。
- 今後、解析とR&D（ターゲット）による中性子源施設の仕様についてこれまでの知見を活用し、基本的な設計を2028年に完成することを目指す。
- 原型炉基盤設備の一環として製作・据え付け等を行い、2035年までに中性子運転を開始し、炉内機器の性能評価試験を目指す。