

QSTの中性子照射施設開発の立場から (核融合分野からの要望)

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
核融合炉材料研究開発部
春日井敦

発電実証までの道筋

現在

核融合燃焼の実証 実験炉

今世紀
中旬

発電実証 原型炉

試験装置
科学的実現性

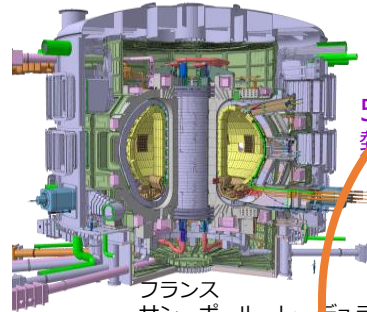
JT-60



超高温プラズマ
の実現

世界最高イオン温度
5.2億度を達成

ITER (国際熱核融合実験炉)



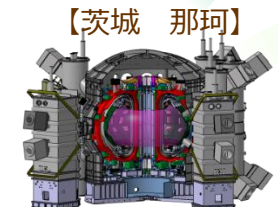
50万kWの
熱出力

フランス
サン・ポール・レ・デュランス市



ITERを支援する

ITERでできないことを補う



【茨城 那珂】
サテライト・トカマク
JT-60SA



【青森 六ヶ所】
国際核融合エネルギー
研究センター



IFMIF/EVEDA
国際核融合材料照射施設
の工学実証・工学設計

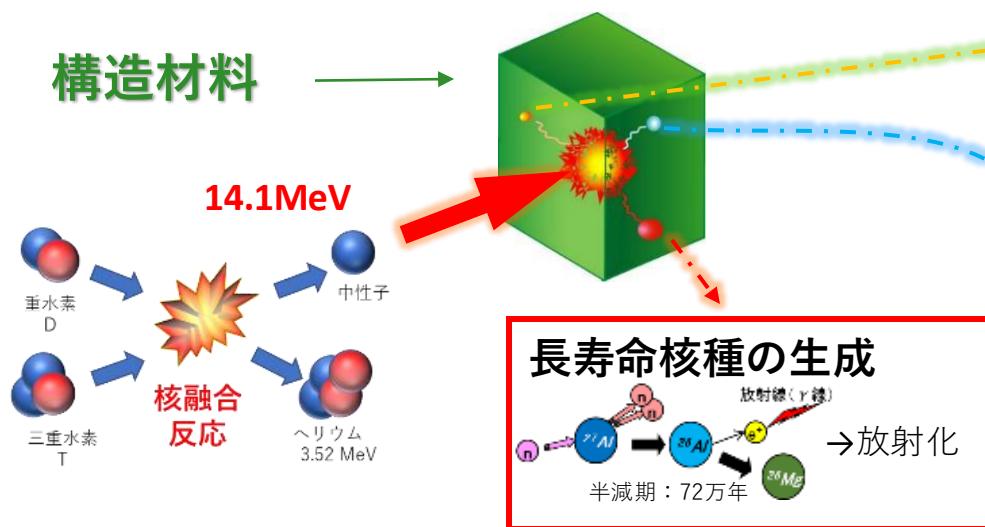
炉設計・
R&D

材料開発

特に原型炉設計に
必要な材料照射
データの取得

核融合中性子源による
照射データの取得が必要

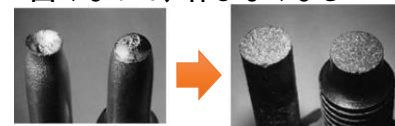
核融合エネルギー研究分野における
幅広いアプローチ(BA)活動



弾き出し損傷

→ 固く・脆くなる

固くなって、伸びなくなる



脆く、割れやすくなる



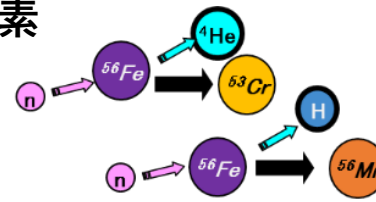
ビリヤードのように原子が弾きだされて傷が入る

原子炉ではなく核融合炉で顕著となる現象

核変換生成ガス元素

→ より膨らむ・脆くなる

膨らむ (スウェリング)



ヘリウムや水素が材料中で発生する



✓ このような現象を完全に封じ込めることは極めて困難

炉内実環境下(核融合中性子照射下)における材料の寿命を明らかにする必要がある

何れにせよ、使用中の特性変化は免れない

→ 特性変化量を把握するとともに、変化を前提とした構造健全性と寿命を保証する設計技術開発が必要

- 高速中性子に耐えられる材料開発・検証 → 日本で開発した低放射化フェライト鋼の耐久試験
- 核融合炉の建設前に中性子を作る → 加速器を使った中性子源

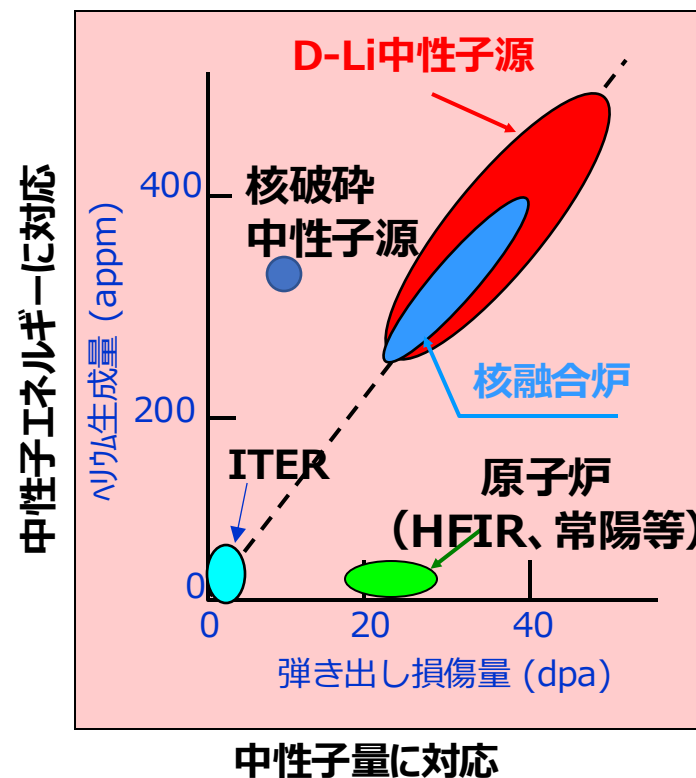
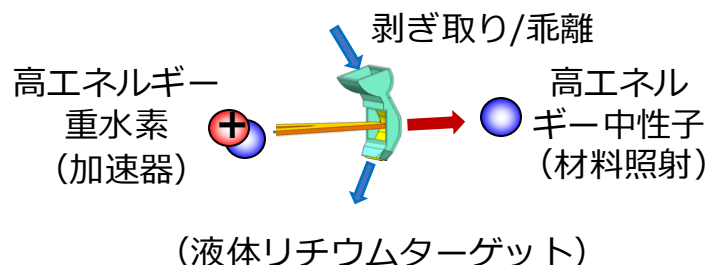
核融合炉では、14MeVという高エネルギー中性子が発生し、材料にダメージを与える可能性がある。核融合原型炉の建設には、核融合反応で発生する同じエネルギーと同じ量の中性子を材料に当てて、材料特性の健全性検証が不可欠。

核融合炉は、核分裂炉よりも発生する中性子エネルギー（14MeV）が高く、材料中のヘリウム生成量が多い。

原子炉………発生する中性子のエネルギーが低い
既存の中性子源……パルスのため発生する中性子の量が少ない



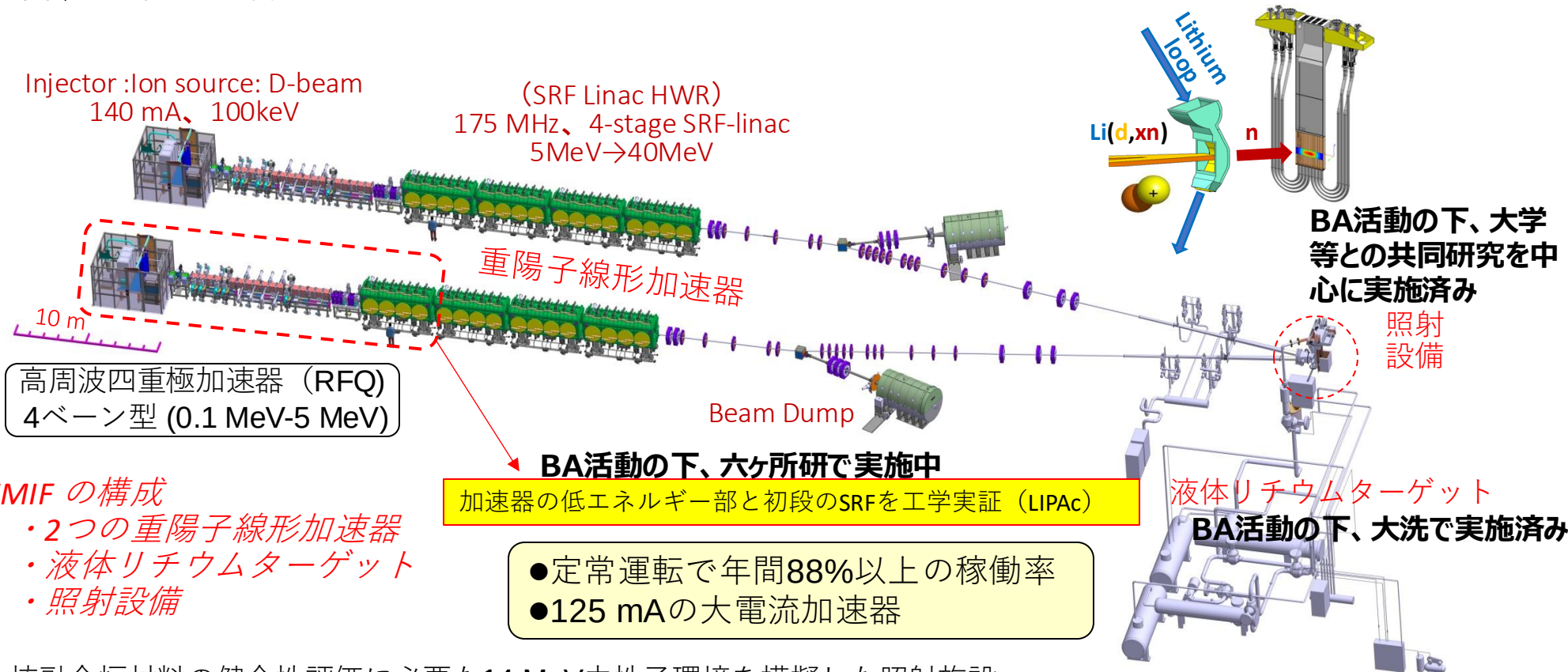
大電流重水素ビームを液体リチウムに当て、核融合反応と同程度の高エネルギー中性子を連続的に大量に生成できる新しいタイプの核融合中性子源



IFMIF（International Fusion Materials Irradiation Facility）

加速器駆動型中性子源 Li(d,n) 反応による中性子
材料照射の研究開発、核融合炉の運転に必要な安全性、
材料、施設の許認可等に用いる

125mA重陽子加速器 2 台
中性子発生量 1.3×10^{17} 個/秒
10MWの除熱



IFMIF の構成

- ・ 2つの重陽子線形加速器
- ・ 液体リチウムターゲット
- ・ 照射設備

核融合炉材料の健全性評価に必要な14 MeV中性子環境を模擬した照射施設

重陽子 (40 MeV-250 mA) → 液体リチウム → 14 MeV中性子 → 材料照射

中性子照射施設のための 原型加速器 (LIPAc)

日欧共同で開発、実証試験中

核融合中性子源施設 (A-FNS) の工学設計

加速器を使って発生する大強度の中性子を、核融合材料照射、及び、様々な中性子応用利用できる施設



核融合中性子源施設

中性子発生部
(リチウム)

核融合材料
照射試験部

産業応用



BA活動で加速器の性能を実証

重陽子

中性子

世界最高強度の中性子を発生 中性子発生量 6.8×10^{16} 個/秒

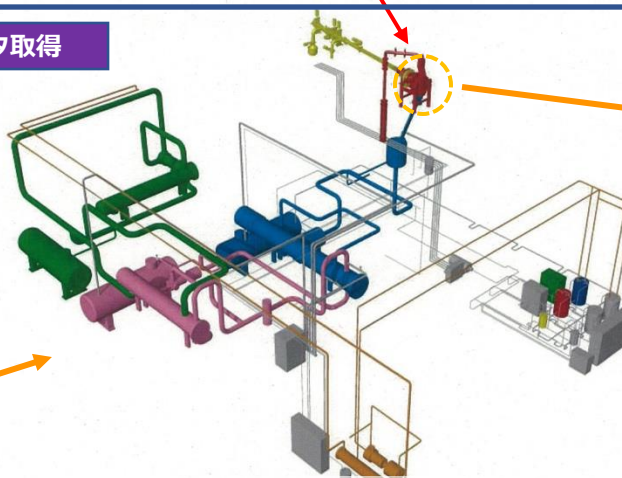
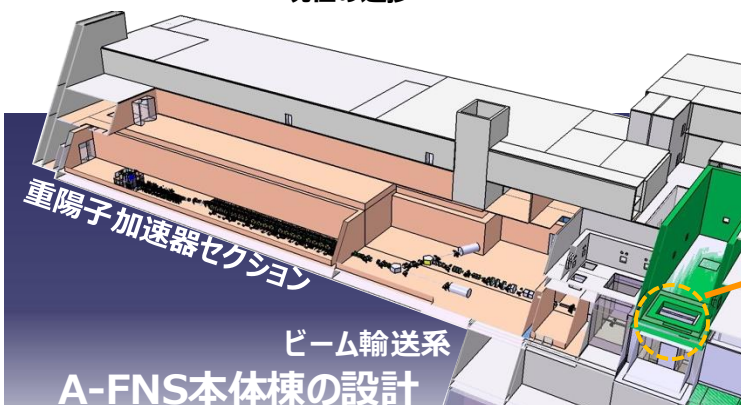
概念設計

工学設計

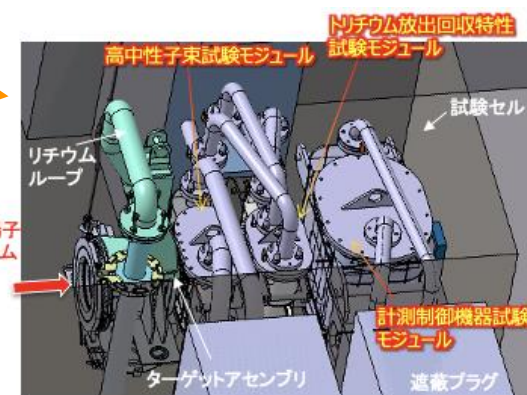
製作・建設

データ取得

現在の進捗



液体リチウムターゲットループの設計



A-FNS照射試験セル及び照射試験モジュール概念図

- 日本独自の活動として、核融合中性子源A-FNSのR&Dと設計活動を実施
- 2020年に概念設計書が完成し、現在は2030年くらいを目標に工学設計を実施中
- 欧州側は独自にDONESを検討していたところ (A-FNSとほぼ同じスペック)

(加速器) **総電流150mAの重陽子イオン源の連続動作、
120mA-5MeV, 8.75%までの重陽子ビーム加速の達成**

- 100mAを超える重陽子ビームで連続動作の実証 (RFカプラー、SRF)
- ビーム損失の制御の実証 (ビームハロー、放射化、ハンズオンメンテナンス等)
- 高可動率 (目標75%) の達成
- ターゲットからのLi蒸気の影響
- 運用コスト

(ターゲット) **実規模レベルにおける安定な液体Li流 (15m/s) の実証**

- Li安定流と計測技術
- ターゲットの交換とリモートハンドリング
- キャビテーションの抑制
- リチウム安全性とリチウム純化系、機器の寿命確認
- ビーム オン ターゲット

(試験セル・照射モジュール) **照射モジュールの製作性の確認**

- 温度管理技術
- 試験片・照射モジュール交換とリモートハンドリング
- DPA勾配、分布

【概要】

- ✓ IFMIF/EVEDAを基にしたスペイン・クロアチアの核融合中性子源計画。
- ✓ 建設予算総額 7 億ユーロ。建設費のうち、スペイン50%、クロアチア5%、欧州20%（見込み）を負担。
- ✓ 照射キャパシティは、建設費及び運転費の貢献に応じて決定。

文科省 第34回核融合科学技術委員会（2023年7月24日）
資料6（文科省資料）

【経緯】

- 2018年 DONESの概念設計報告書が完成
- 2019-2021年 スペインを始めとした欧州10カ国でDONES-Prep（準備会合）を実施し、組織体制や法的枠組み等について検討（日本はオブザーバーとして参加）
- 2022年 9 月 スペイン グラナダにて建屋の建設を開始。2033年より運転（20年間）を開始予定
- 2023年 3 月 DONES運営委員会が発足し、正式に計画が始動。オブザーバーとして、日本、欧州、フランス、ドイツ等も参加。

【今後の予定】

今年10月にレビュー委員会を開催し、ベースライン（技術的側面、コスト、スケジュール等）を精査する予定。その後、10月26日の第2回DONES運営委員会にて、レビュー結果が報告・審議される可能性あり。



原型炉開発アクションプランにおける核融合中性子源の記述

合同特別チームの活動フェーズ 黒: 開始事項 赤: 完了事項	概念設計の基本設計	概念設計	工学設計/製造設計
	2015	2020頃	2025頃 2035頃
8.核融合炉材料と規格・基準 (2)その他の材料	増殖機能材料の製造及び再使用技術の最適化	原子炉照射影響評価	
		増殖機能材料充填体の機械特性評価/製作技術確立(ITER-TBM2号機)	
		Li確保技術開発	
		耐照射性ダイバータ材料の開発、原子炉照射影響評価	
	計測・制御機器材料の原子炉照射劣化データベース	原子炉耐照射性 計測・制御機器材料の評価	
	核融合材料ハンドブックの策定		
(3)核融合中性子源		核融合中性子源の設計・建設	
増殖機能材料(中性子増倍材料及び三重水素増殖材料)	(15)Q:増殖機能材料の製造及び再使用技術の最適化(22) (18)Q:増殖機能材料充填体の機械特性評価/製作技術確立(30) (18)Q:Li確保技術開発(34)	----->(15)Q:増殖機能材料の製造及び再使用技術の最適化(22) (23)Q:原子炉照射影響評価(30) ----->	----->(23)Q:原子炉照射影響評価(30) ----->(18)Q:増殖機能材料充填体の機械特性評価/製作技術確立(30) ----->(18)Q:Li確保技術開発(34)
ダイバータ材料	(15)N/大:原子炉照射影響評価(26) (18)Q/N/大:耐照射性材料開発と評価(34)	----->(15)N/大:原子炉照射影響評価(26)	----->(18)Q/N/大:耐照射性材料開発と評価(34)
計測・制御機器材料	(15)Q/特:照射劣化データベースの整理 --(19)	(20)Q/N/大:耐照射性材料の評価(35)	----->(20)Q/N/大:耐照射性材料の評価(35)
その他	(15)Q/N/大:核融合材料ハンドブックの策定--(19)		
核融合中性子源	(15)Q:核融合中性子源の設計・建設(42)	----->	----->(15)Q:核融合中性子源の設計・建設(42)
			(43)Q/大:核融合中性子源照射試験 --(*)

文科省 第34回核融合
科学技術委員会
(2023年7月24日)
資料6 (文科省資料)

(参考) 原型炉開発に向けたアクションプラン項目別解説の抜粋

核融合中性子照射試験

核融合中性子源 (A-FNS) による原型炉ブランケットの構成要素やコンポーネントの核融合中性子照射試験を行い、それぞれの機能を検証する。また、A-FNSによる核融合中性子照射試験を開始するまでは、**欧州が計画する核融合中性子源 (DONES) に参画してデータを取得することも想定する。**



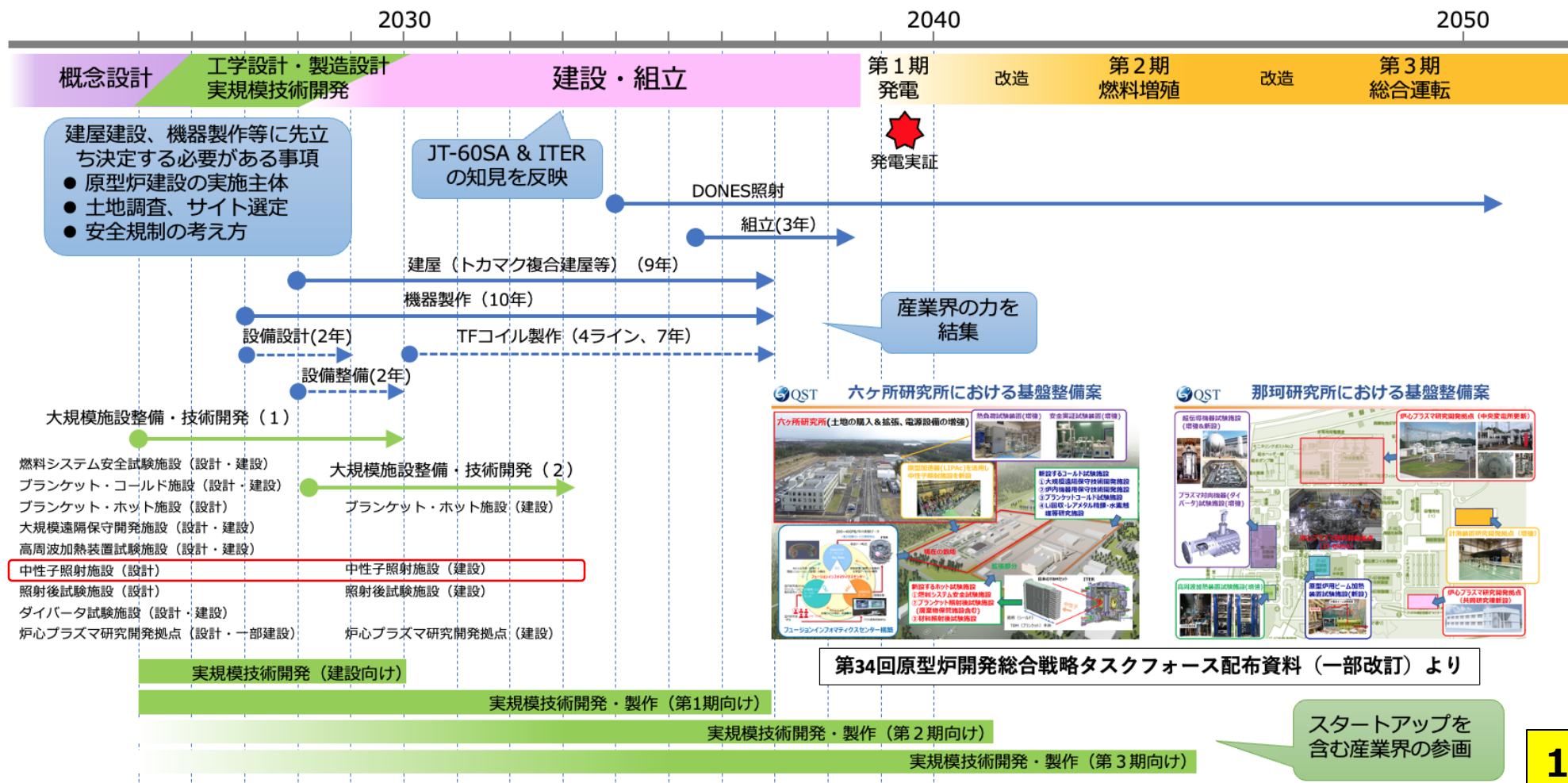
DONES計画の進展も踏まえ、核融合中性子源についても、アクションプランの各課題の推進策とともに原型炉開発総合戦略タスクフォースにて検討する予定

文科省 第41回核融合科学技術委員会

(2025年2月7日) 資料2 (文科省提出資料) より抜粋

2030年代発電実証を目指したスケジュール (イメージ)

5



MS10 キックオフシンポジウム
(2025年2月14日)
奥野PM資料から抜粋

1A重陽子線形加速器の使い途

1A重陽子線形加速器を軸とした加速器施設。核融合燃料、中性子照射試験（核融合炉材料およびブランケット）に留まらず、医療、医療用RI、材料試験、元素変換の実証と多彩な中性子利用に展開する事が可能

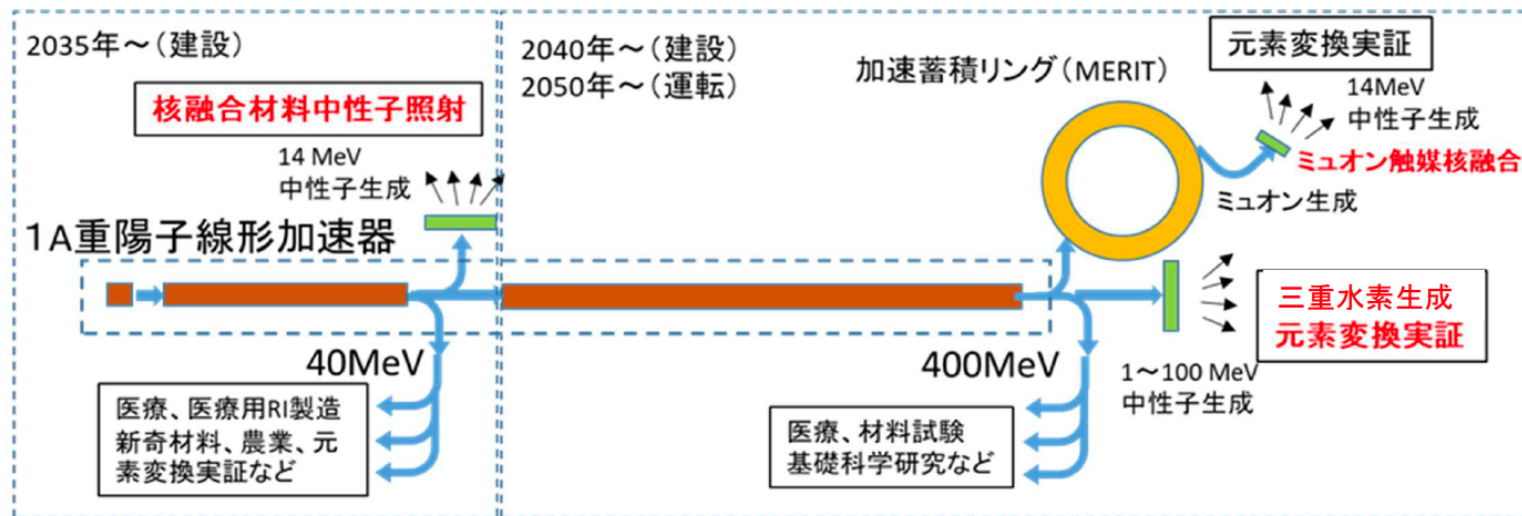
アウトカム：

IFMIFの10倍程度の中性子発生量→材料開発を一気に加速（破壊的イノベーション）

初期充填用核融合燃料を国産で生成

ミュオン触媒核融合の開発基盤提供

高レベル放射性廃棄物の処理（実証）



- IFMIFの10倍の中性子発生量であれば非常に魅力的
- 2040年の運転開始なら原型炉の材料照射試験に利用できる
- 技術到達度、運用コスト、使用電力等について検討が必要



工学設計・実規模技術開発の加速

- フュージョンエネルギー・イノベーション戦略で掲げられた産業化も考慮しつつ、ITERと原型炉の間にある技術的ギャップを早期に解消するため、工学設計・実規模技術開発フェーズにおけるR&Dを加速する必要がある。
- R&Dの加速により、ITER計画やBA活動で得られた日本の技術や人材を、散逸せずに原型炉研究開発に継承することが可能。
- 原型炉建設に必要な技術開発と施設・設備については「原型炉開発に向けたアクションプラン」に纏められている。ITER計画やBA活動で培った技術と経験や国内外の施設・設備の現状も踏まえて、QSTに整備すべきと考える施設・設備は以下の通り。

- ◆ トリチウム大量取扱施設
- ◆ ブランケット試験施設（ホット施設・コールド施設）
- ◆ 大規模遠隔保守・炉内機器保守技術開発施設
- ◆ ビーム加熱・高周波加熱装置試験施設
- ◆ 中性子照射施設
- ◆ 超伝導機器試験施設
- ◆ ダイバーク試験施設



原型炉開発用中性子源という位置づけでブランケット等の中性子実験が実施可能な核融合中性子源など

文科省 第34回原型炉開発総合戦略TF
(2024年6月3日)
資料4 (文科省提出資料) から抜粋

(1) 目的

原型炉ブランケットのサブモジュールの以下の機能検証を機動的に実施できる中性子照射施設とすること。

1. トリチウム生成量/トリチウム増殖率の確認
2. 核発熱のモデル化と検証
3. 計測装置の動作確認
4. 構造健全性確認（モジュール照射）

(2) 要求される条件

- 原型炉よりも先に実施
- 低コストでコンパクト
- 中性子発生量 1×10^{14} 個/秒レベル（A-FNSやDONESの約1/100の中性子発生量を想定）
- 産業応用も可能な多目的中性子源

(3) 状況

- LIPAcを利用・拡張し、D-Li中性子源に改造することを検討している。
 - 加速器（重陽子エネルギー9MeV、125mA）（既設）
 - 液体リチウムターゲット、照射施設（新設）
- 加速器DT中性子源の採用もオプションとして検討中（トリチウムガスターゲット）

• 候補材料照射

- 原型炉対向壁材：低放射化フェライト鋼F82H ～20dpa照射
- ダイバータ候補材料：タングステン、銅 物理パラメーターはDPA

DONES/A-FNS

• ブランケット性能試験

- 核発熱生成率・崩壊熱
物理パラメーターはGy、トリチウム反応率RR、回収率 (Bq/kg)
- トリチウム生成・回収特性
物理パラメーターはトリチウム反応率RR、回収率 (Bq/kg)

原型炉用
中性子源

• 安全評価

- 遮蔽性能・放射化量低減

• 制御・計測機器の照射特性

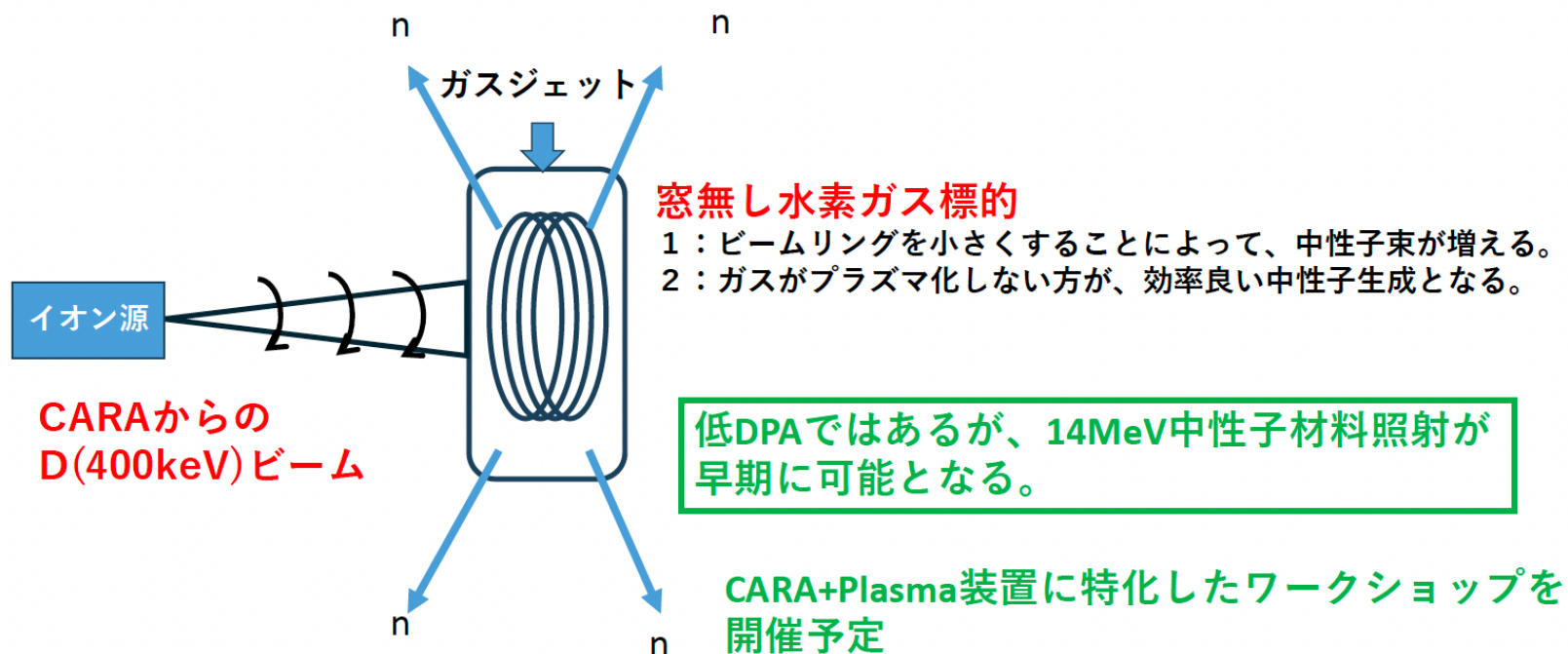
- コイル核発熱・除熱評価
- 計測制御照射特性評価
- 電子・光学デバイス照射特性評価

核融合中性子源による材料照射は実験データがない（最優先事項）。
DT中性子によるブランケット・安全評価・制御計測機器の照射特性は一定の実績あり、
ITER-TBMなど最近のデザインを反映した試験は十分とは言えない

MS10 キックオフシンポジウム
(2025年2月14日)
奥野PM資料から抜粋

CARAの使途 (一例)

DT反応による14MeV中性子源



- 中性子発生量 1×10^{14} 個/秒レベル以上であれば魅力的
- 今後10年間の間に照射試験を開始したいので、タイムラインに合うか？
- QSTが検討する原型炉用中性子源は基本的に既存技術で検討。R&Dを想定していない。

- 日欧協力で進めるIFMIF原型加速器（LIPAc）は、2026年から最終試験を開始する予定。125mA-CW加速実証に向けた調整を継続中。
- IFMIF/EVEDA事業においてさまざまな課題を抽出し、解決方法を模索中。
- スペインが主導して進めているDONES計画（日本のA-FNSと同様の中性子源）が動き出し、日本としては政府間協議の下、計画に参画する方向で検討中。原型炉材料の中性子照射試験を2030年代にDONESを活用して実施。
- フュージョンエネルギーイノベーション戦略に基づき、原型炉を加速するための原型炉用中性子源を別途検討。A-FNSの1/100程度の中性子発生量で、低コストで早期実現を目指す。主にブランケット機能検証のため原型炉R & Dを10年以内に実施。
- 上記の計画に、奥野プロジェクトで進める中性子源のスペックとスケジュールが合致するのであれば非常に魅力的。