

# QSTにおける先進核融合中性子源(A-FNS)計画



**量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所**  
**春日井 敦**

粕谷 研一, 小林 創, 近藤 浩夫, 権セロム, 中村 誠, 落合 謙太郎, 太田 雅之, 小柳津 誠,  
朴 昶虎, 佐藤 聡, 手塚 勝(量研/六ヶ所)

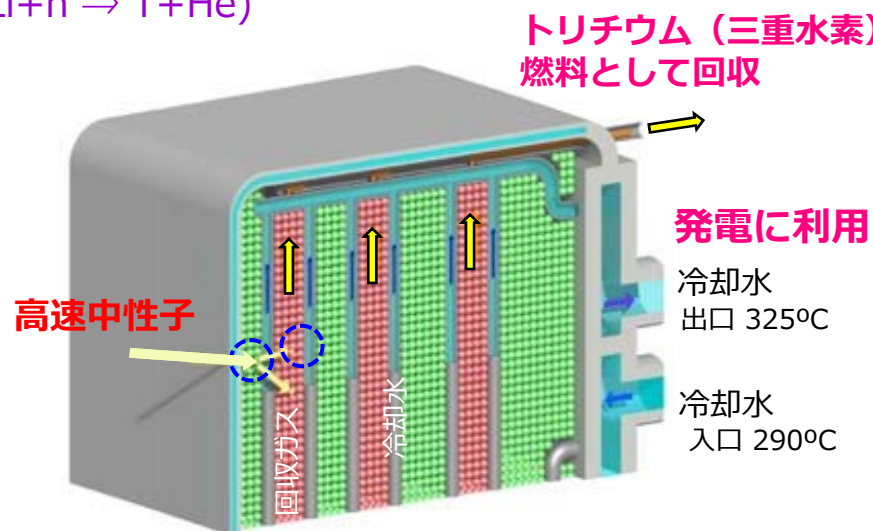
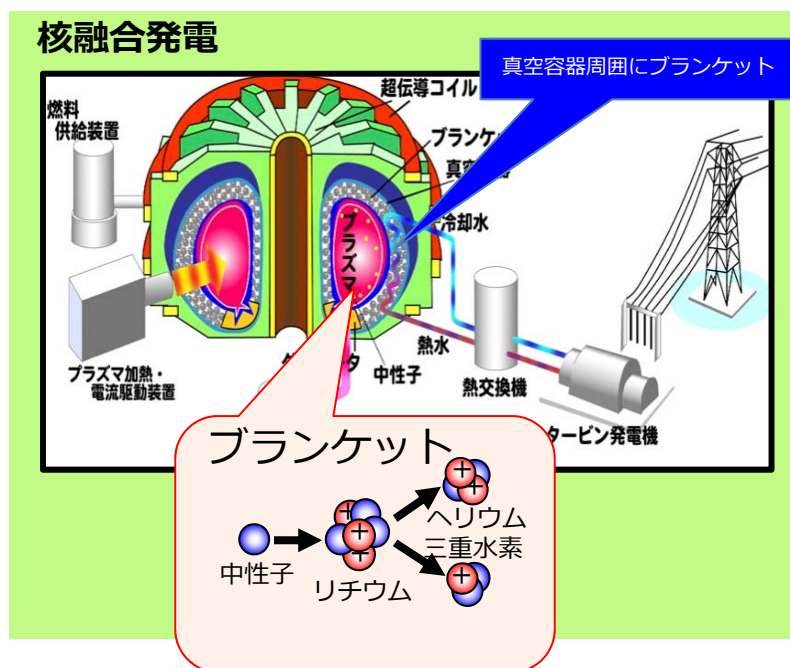
National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

1. 加速器を用いた核融合中性子源の必要性
2. 先進核融合中性子源(A-FNS)の目的
3. システム全体の構成概念と加速器の仕様
4. 中性子照射モジュールと多目的用途
5. A-FNSのサイトレイアウト
6. スケジュール
7. まとめ

# 核融合のエネルギーを取り出す

## 核融合反応のエネルギーは主に中性子が持っている

- プラズマの周りの壁に中性子が衝突し、冷却水を熱する  
中性子は、磁場に巻きつかないので磁場をすり抜け壁に衝突
- 発生した中性子を使って燃料のトリチウムを生成  
ベリリウムを使って中性子を増倍 ( $\text{Be} + n \Rightarrow 2\text{He} + 2n$ )  
リチウム-中性子反応でトリチウム生成 ( ${}^6\text{Li} + n \Rightarrow \text{T} + \text{He}$ )



- 高速中性子が当たると材料が変化
- もろくなる、別の元素に変わる等

**核融合反応で発生する高速中性子にも耐えられる材料開発が必要**

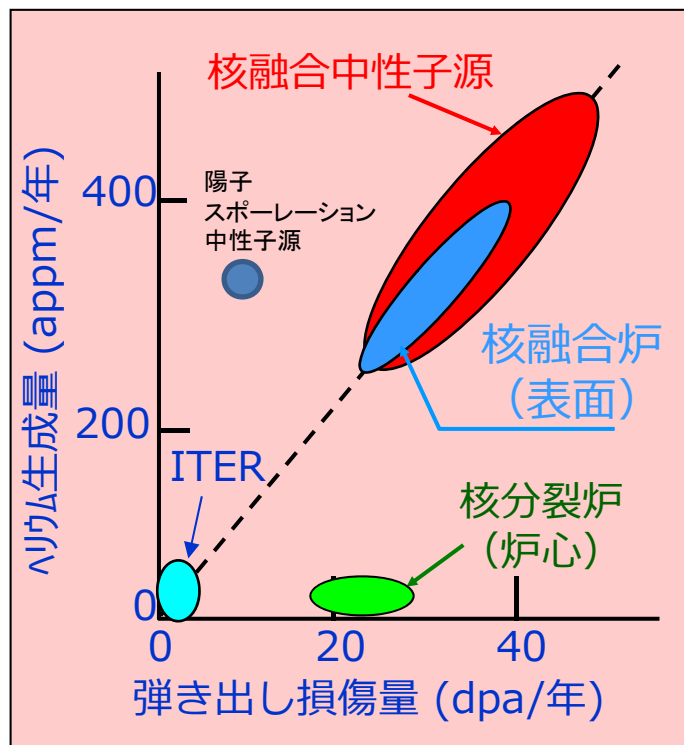
# 加速器を用いた核融合用中性子源

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。

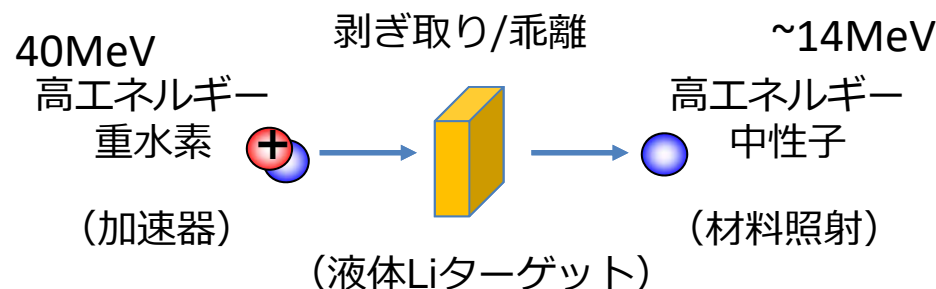
原型炉では、80 dpa程度まで構造材が中性子照射に晒される  
原型炉設計のため、最低限10 dpa/yearの照射試験が必要

既存のDT中性子源では、強度が不十分  
その他の中性子源では、He生成量と弾き出し損傷の比の観点から核融合炉を模擬できない

加速器駆動型中性子源 Li(d,nx) 反応による中性子を使って高エネルギー（>~14MeV）の中性子を発生して、材料の耐久性を調べる。



核融合中性子源:最大中性子発生率  
:約 $1.3 \times 10^{17}$ 個/秒



# 国際核融合材料照射施設(IFMIF)の 工学実証・工学設計活動(EVEDA)の位置付け

核融合原型炉の建設には、核融合中性子と同じ速さ（エネルギー：14 MeV）を持つ中性子の重照射（ITERの20～30倍の積算量）により、核融合燃焼部に対向する機器の材料特性への影響を検証しておくことが必要。→そのため既存加速器の約100倍の重陽子ビーム電流を発生できる加速器を2基備えた材料照射施設の開発が必要。

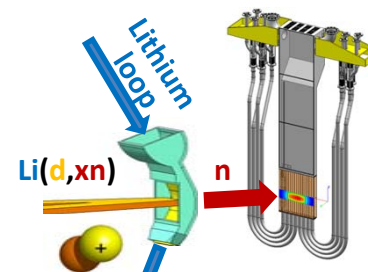
Injector : Ion source:  
D-beam  
140 mA、100keV

高周波四重極加速器 (RFQ)  
4ベーン型 (0.1 MeV-5 MeV)

(SRF Linac HWR)  
175 MHz、4-stage SRF-linac  
5MeV→40MeV

Beam Dump

重陽子線形加速器



照射設備

主に大学との共同研究にて実施

液体リチウムターゲット



@六ヶ所

2018年6月にRFQまでのビーム加速開始。  
2020年1月から全ての加速器を組み合わせた統合ビーム試験を実施予定



@大洗

リチウムターゲット最大20m/秒、長時間の安定性実証

BA活動では、日欧の国際協力で

- ✓ 加速部一基分の、入射器 + 高周波四重極線形加速器 + 9MeV迄の超伝導線形加速器からなる原型加速器、
- ✓ 目標速度の液体リチウム標的膜の生成・維持を実証する1/3規模の試験施設 (@大洗研)、
- ✓ 中性子照射部主要機器の実機大試作機を製作して性能を確認し、要素技術を開発する。

# 核融合中性子源A-FNSの目的

**目的:** 核融合科学技術委員会策定の「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」に基づいて、「チェックアンドレビュー項目」及び「アクションプラン」で示されるとおり、**原型炉段階への移行判断のために、以下の照射データを2035年頃までに取得。**

- 炉材料の候補材である低放射化フェライト鋼の20dpa照射データ、ブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射データ
- ブランケットのトリチウム挙動評価技術の検証
- 計測・制御機器材料の耐照射性評価

**応用利用:** 中性子の医療・産業利用(例 医療用アイソトープ製造等)

文科省が策定した核融合原型炉研究開発のロードマップに「核融合中性子源(A-FNS)」について、「**国際協力を得ながら、A-FNSの建設を具体化することが望ましい**」と記載

ロードマップの論点

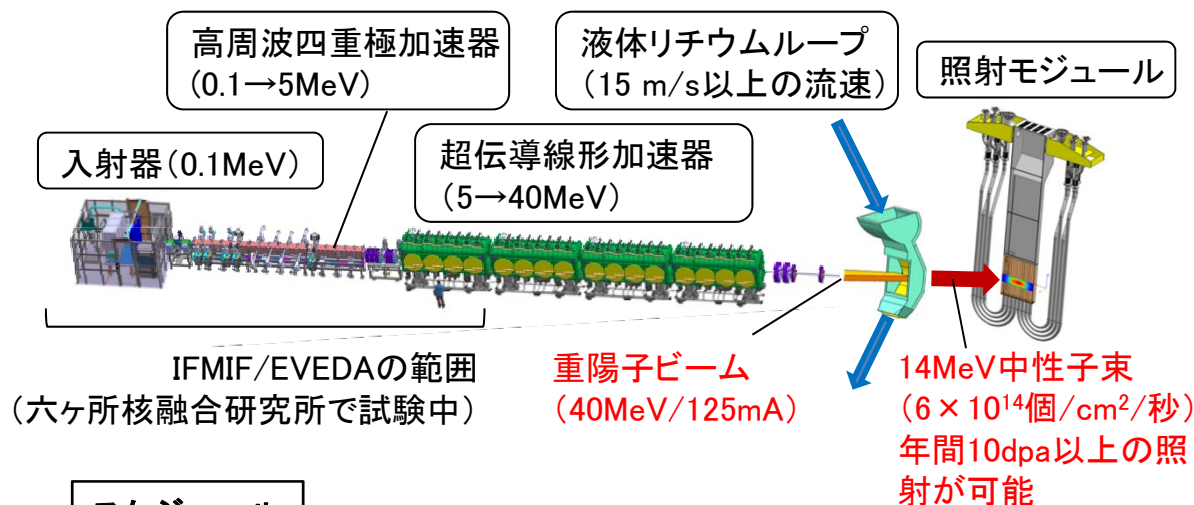
- ✓ 原型炉開発には、炉内中性子環境を模擬し、材料データ取得が不可欠
- ✓ 日欧で構想検討が進む(日:A-FNS, 欧:DONES)
- ✓ 第2回中間C&Rで建設移行判断
- ✓ IFMIF/EVEDAの成果を活かし、国際協力を得ながら、A-FNS構想を具体化

IFMIF/EVEDAの成果を活用し、IFMIFの半分の強度を持つ先進核融合中性子源A-FNSを早期に実現させる。欧州はDONESを検討。

# IFMIF/EVEDAを基にした中性子源の展開

## A-FNSの概念図

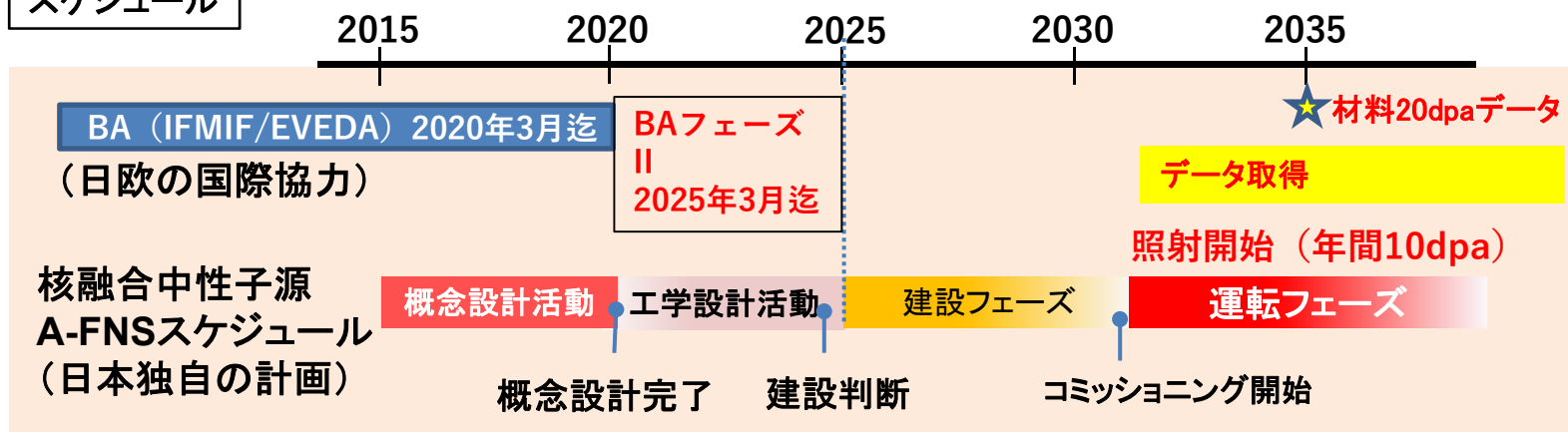
○幅広いアプローチ(BA)活動のIFMIF/EVEDAから得られた成果を基に建設  
世界に類のない大電流・定常運転が可能な加速器の開発  
最大毎秒20mの高速リチウム流の長時間安定運転の実証



IFMIF/EVEDAの成果を活用し、IFMIFの半分の強度を持つ核融合中性子源を早期に実現し、2035年までに照射試験データを取得

→ 先進核融合中性子源  
**A-FNS**

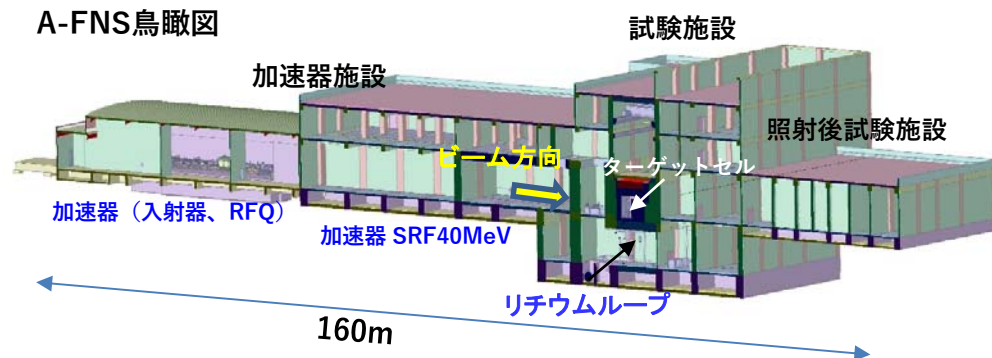
## スケジュール



# A-FNSの概念

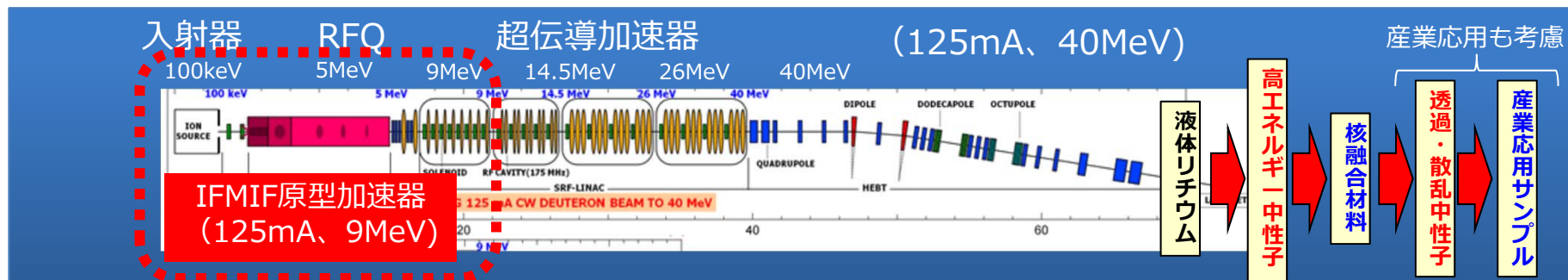
## A-FNSの概念図

延べ床面積23000平米、地下構造



## A-FNSの物理パラメーター

重陽子エネルギー	40MeV
重陽子ビーム電流	125mA
中性子発生率	$6 \times 10^{16}$ 個/秒
中性子フラックス	$6 \times 10^{14}$ 個/cm <sup>2</sup> /秒
(高フラックス領域で 年間10dpa以上の照射が可能)	



IFMIF/EVEDAの成果を利用して設計

A-FNS固有の設計

BA活動で培った技術を基に超伝導線形加速器を3基追加し、加速エネルギーを40MeVとした加速器とするとともに、液体Liに重水素ビームを当てて、強力な高エネルギー中性子を連続的に発生させる核融合中性子源の建設を目指す。

⇒ 照射する核融合材料の周りにサンプル等を設置すれば、中性子による医療用RI製造や産業応用が可能

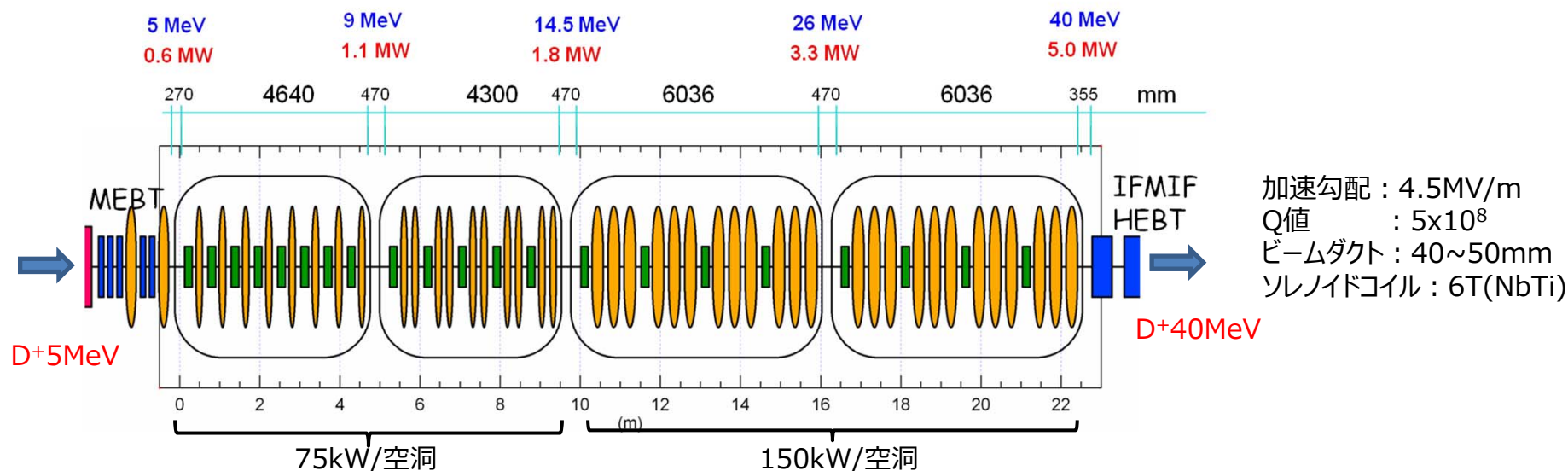


# A-FNSの加速器系（クライオモジュールの追加）

- ✓ IFMIF中間工学設計報告書の設計をベース
- ✓ イオン源、LEBT、RFQ、MEBT、初段のRFQは現在試験中の原型加速器と同じ
- ✓ 3式のクライオモジュールを追加して40MeVまで加速。

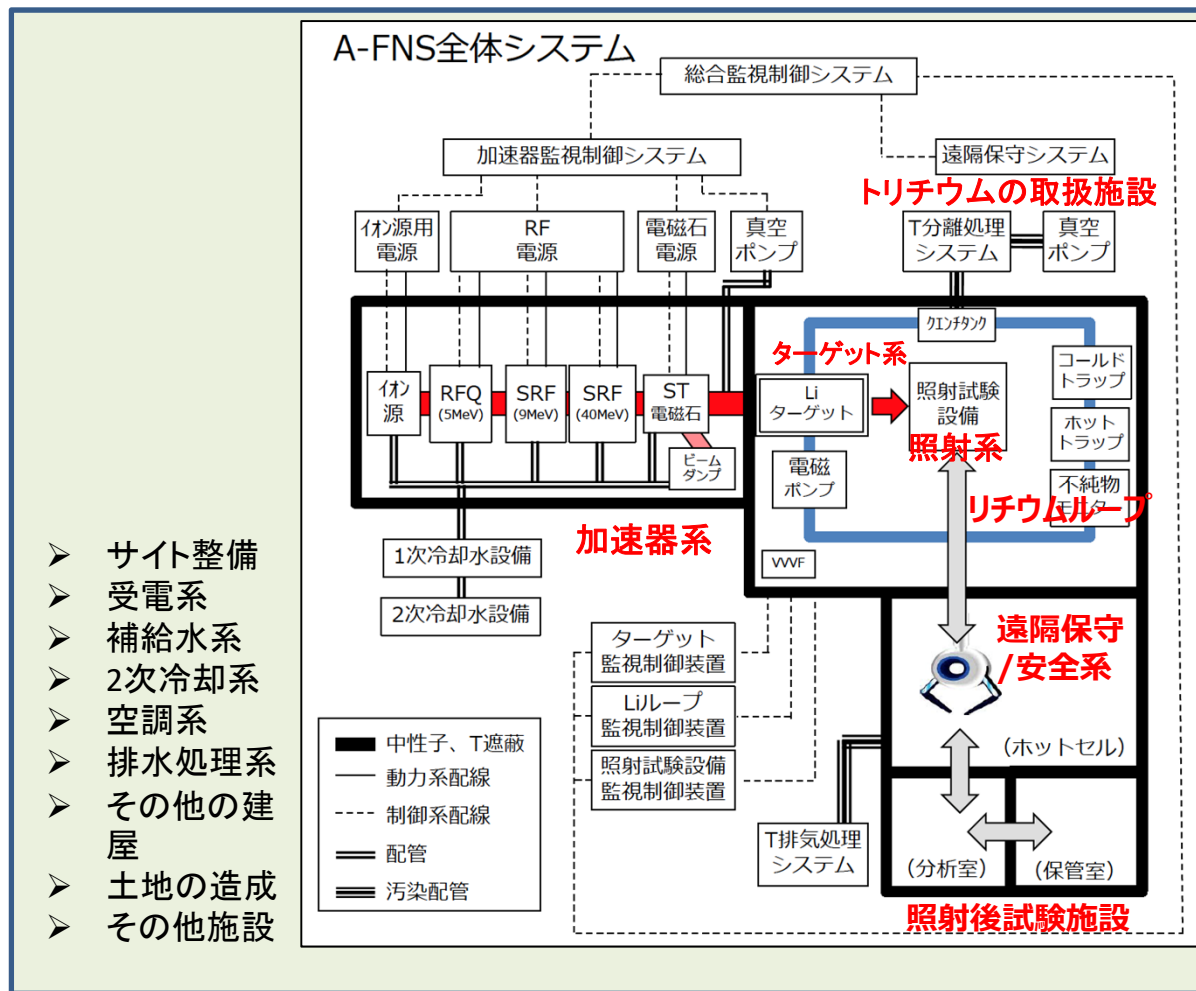
## 設計手法

- SRF構造：GenLinWinコード。幾何学的キャビティの $\beta$ 値、遷移エネルギー、長さあたりの共振器数の最適化を満たしながら、最小の空洞を有する最短の線形加速器を設計
  - ビームシミュレーション：TraceWinコード、 $10^6$ 個以上のマクロ粒子でのマルチパーティクルシミュレーション（ハローマッチング、エミッタンス マッチング）を実施
  - メンテナンスの制約から、損失は1W / m以下に抑制
- 第1クライオモジュール：1つのソレノイドと1つの半波共振器の8周期 ( $\beta = 0.094$ )
  - 第2クライオモジュール：1つのソレノイドと2つの半波共振器 ( $\beta = 0.094$ ) の5周期
  - 第3、4クライオモジュール：4つのソレノイド周期と3つの半波共振器 ( $\beta = 0.166$ )



# A-FNSの全体システム構成図

A-FNSは加速器を利用した核融合の中性子を模擬した中性子発生装置



- サイト整備
- 受電系
- 補給水系
- 2次冷却系
- 空調系
- 排水処理系
- その他の建物
- 土地の造成
- その他施設

## 加速器系

- ・世界最大電流の加速器
- ・長期間の連続運転（～100日/年）

## ターゲット系

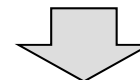
- ・真空中での高速液体Li流
- ・Li純度管理（低放射化）
- ・システム寿命（腐食、キャビテーション等）

## 照射系

- ・強度な放射線環境下での試験
- ・トリチウム取扱
- ・多様な照射試験

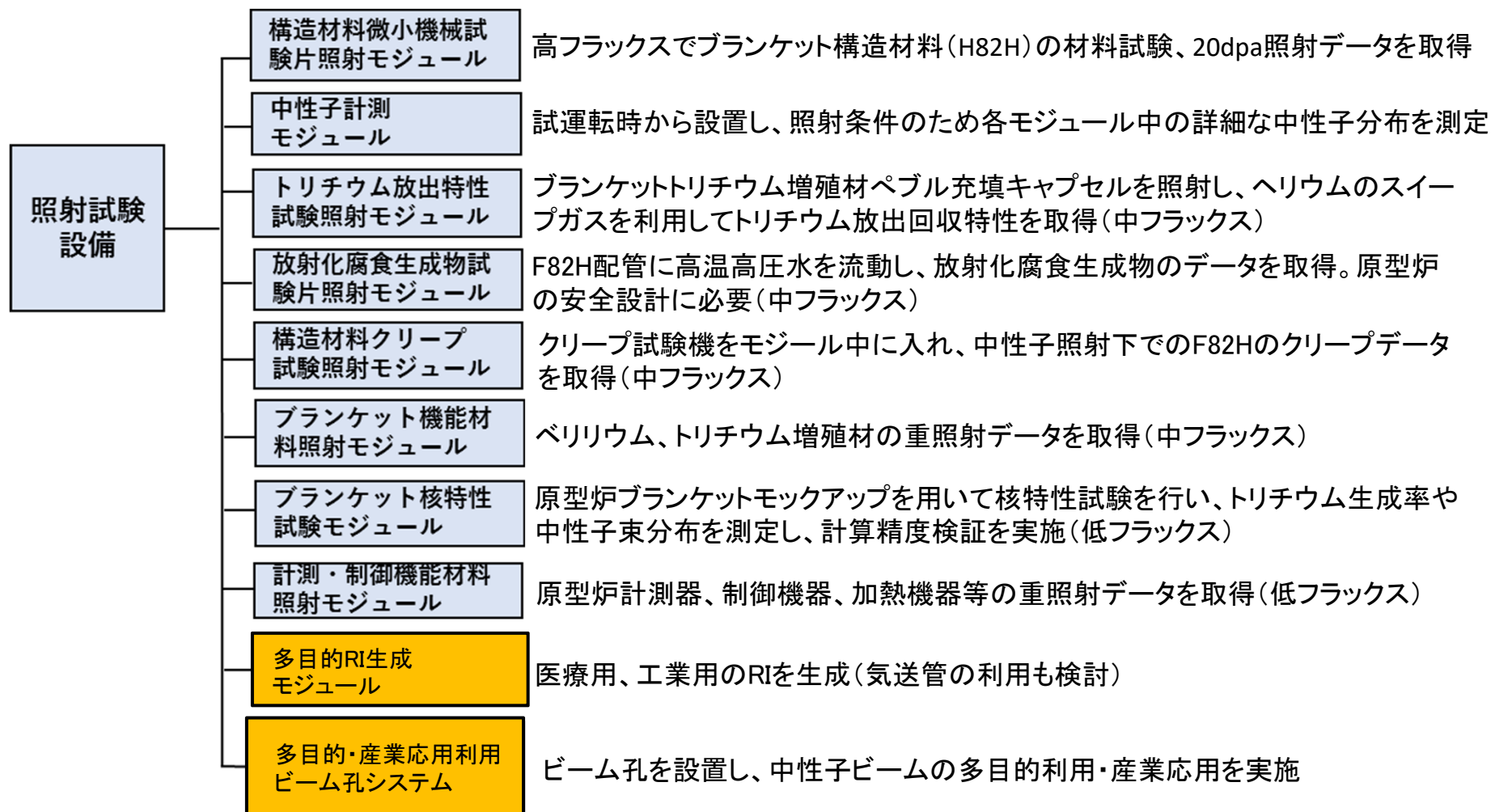
## 遠隔保守系/プラント系

- ・遠隔保守メンテナンス
- ・プラント設計
- ・高い信頼性と安全性



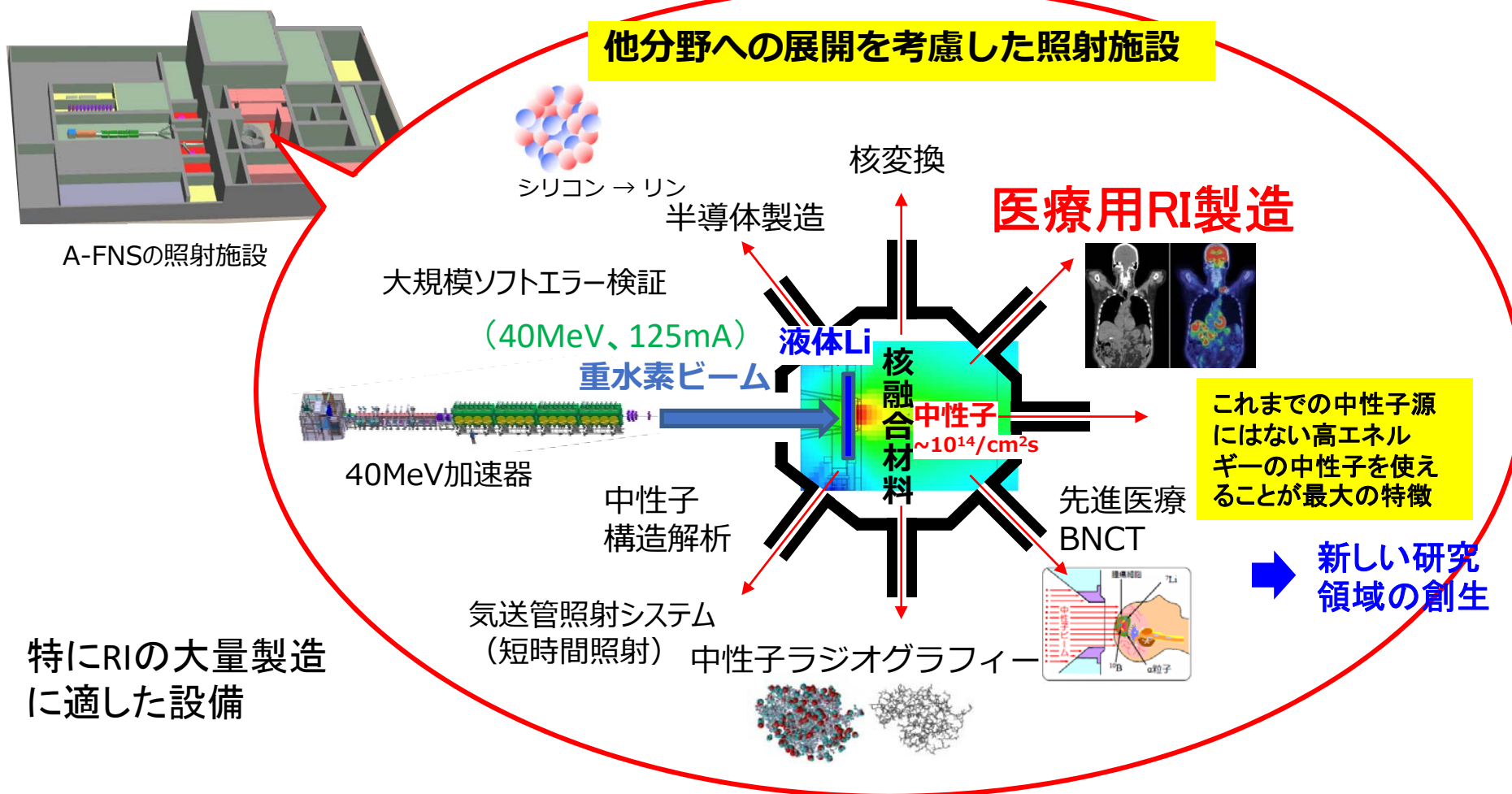
大学・産業界と連携し設計活動を加速

多様な核融合炉用照射試験モジュールと産業利用に供するフレキシブルな照射場を提供

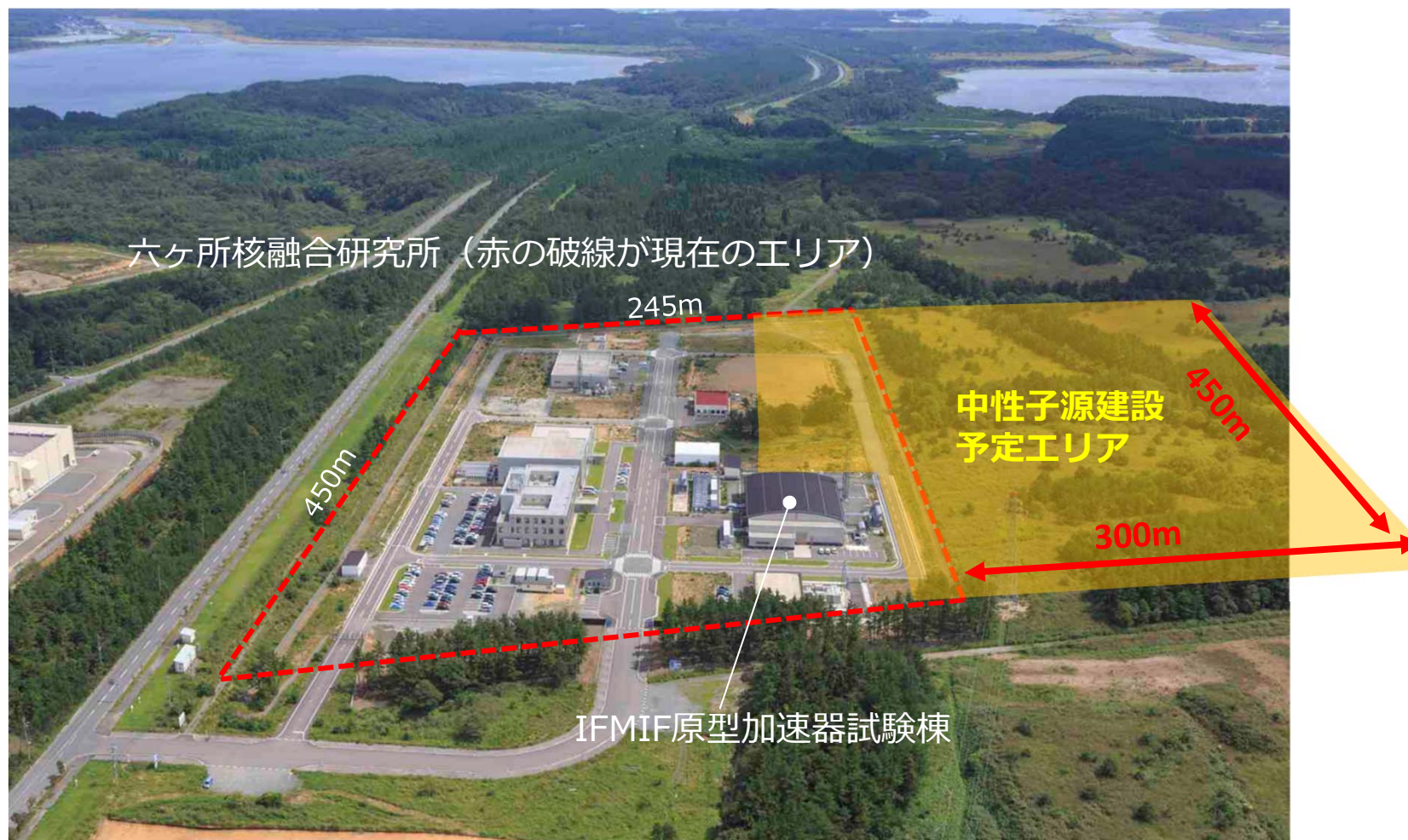


# 多様な用途を目指した中性子源

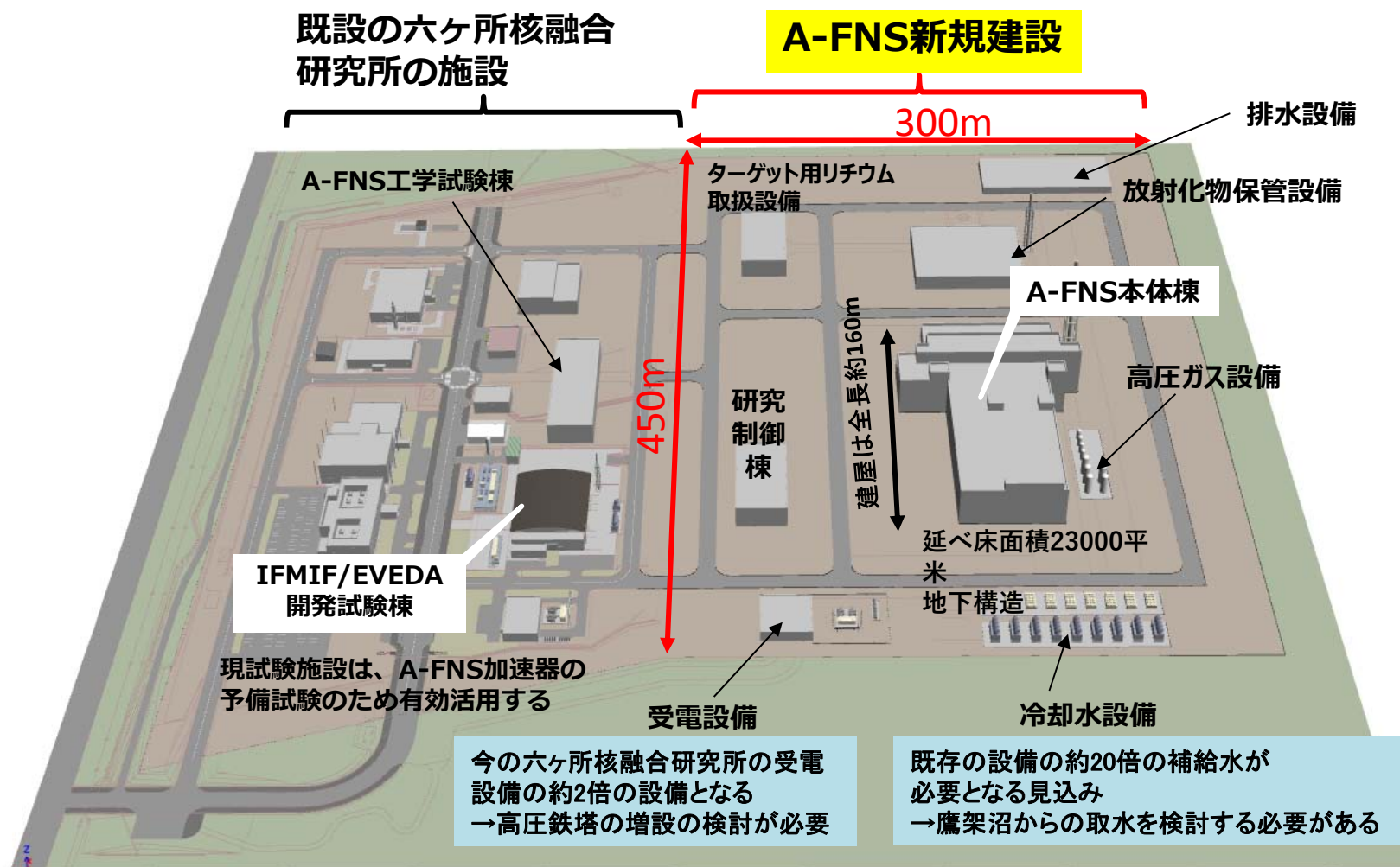
- **A-FNS**は核融合炉材料開発だけに留まらず、国内の**基礎研究・産業・医療・エネルギー**応用までを網羅する汎用性の高い**高速中性子照射場**を提供する予定。
- これまで原子炉で実施してきた中性子利用がA-FNSに置きかわる可能性



# 六ヶ所核融合研究所でのA-FNSサイト案



# A-FNSサイトレイアウト案

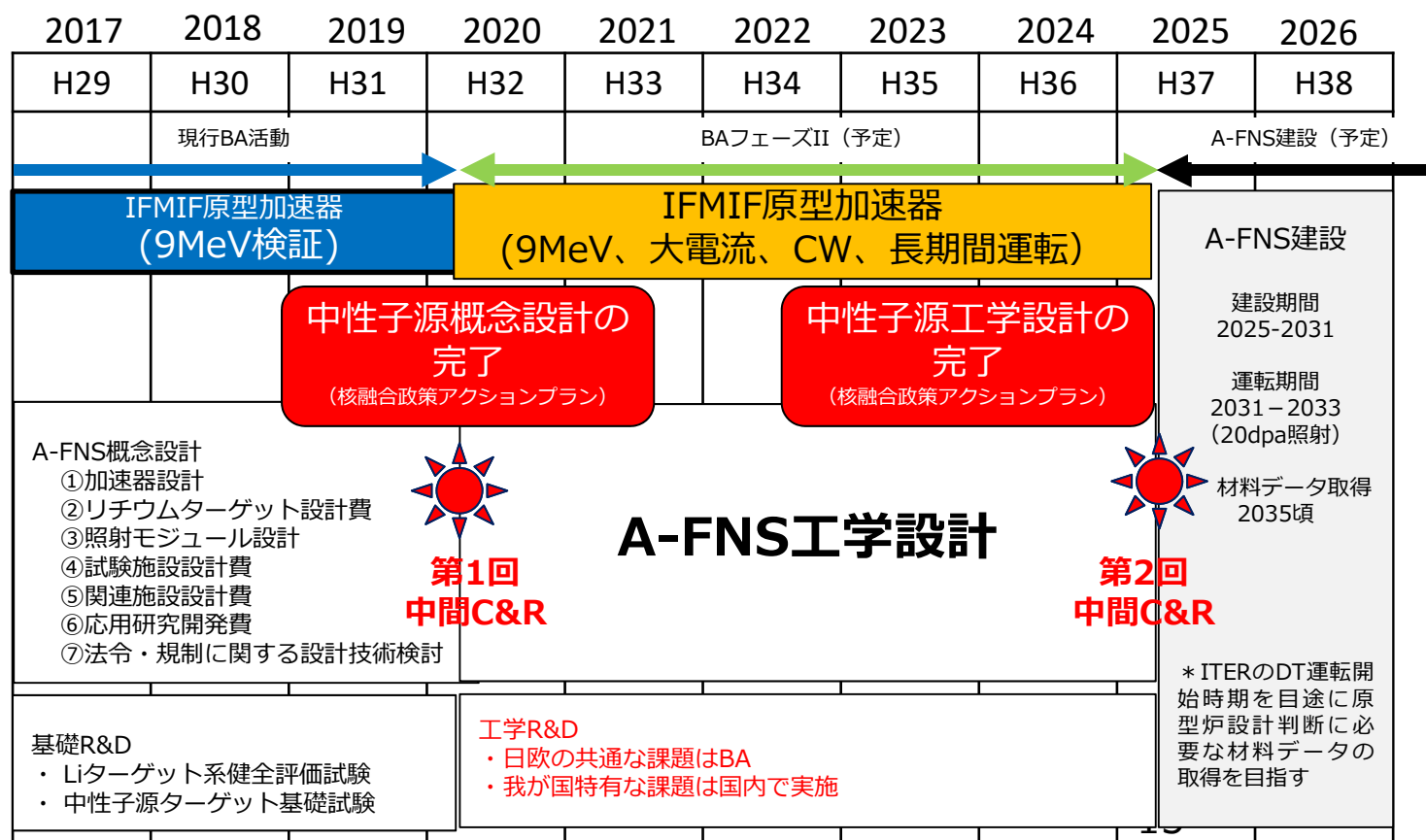


現在の六ヶ所核融合研究所の敷地面積は、  
約11ヘクタール(排水路を含めると13ヘクタール)

(敷地面積は今と比べ約2倍となる見込み)  
A-FNS用追加敷地面積は、約13.5ヘクタール

# 核融合中性子源設計のスケジュール案

- ✓ 第1回中間C&R（2020年）では、A-FNSの建設推進判断。設計R&Dを実施し概念設計を完了。その後加速器の技術実証とA-FNSの工学設計を進める。
- ✓ 第2回中間C&R（2025年）では、A-FNSの建設移行判断。工学設計を完了。建設設計と建設を速やかにすすめる。



- A-FNSは、文部科学省の原型炉のロードマップ、アクションプランに基づいた2035年頃の原型炉建設判断までに必要な材料照射試験データ等を取得することを目的とする。
- IFMIF/EVEDA事業の研究資産を最大限に活用した国内用の強力中性子源。
- 中性子の多用途利用を考慮して設計を行う。
- 2030年頃のA-FNS中性子源運転を目指し、2020年の概念設計を完了、2025年の工学設計と加速器の長時間運転・信頼性試験を完了を目指す。2回のチェックアンドレビューを経て建設移行判断を行う。
- 並行して、日欧協力の下、IFMIF原型加速器開発を進めながら中性子源用加速器の概念設計に向けた検討を行う。