



核融合炉研究最前線と 産業応用ポテンシャル

*Forefront of Fusion Reactor Development and
Industrial Application Potential*



六ヶ所核融合研究研
Rokkasho Fusion Institute

石田 真一
Shinichi Ishida

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門
六ヶ所核融合研究所
QST Rokkasho

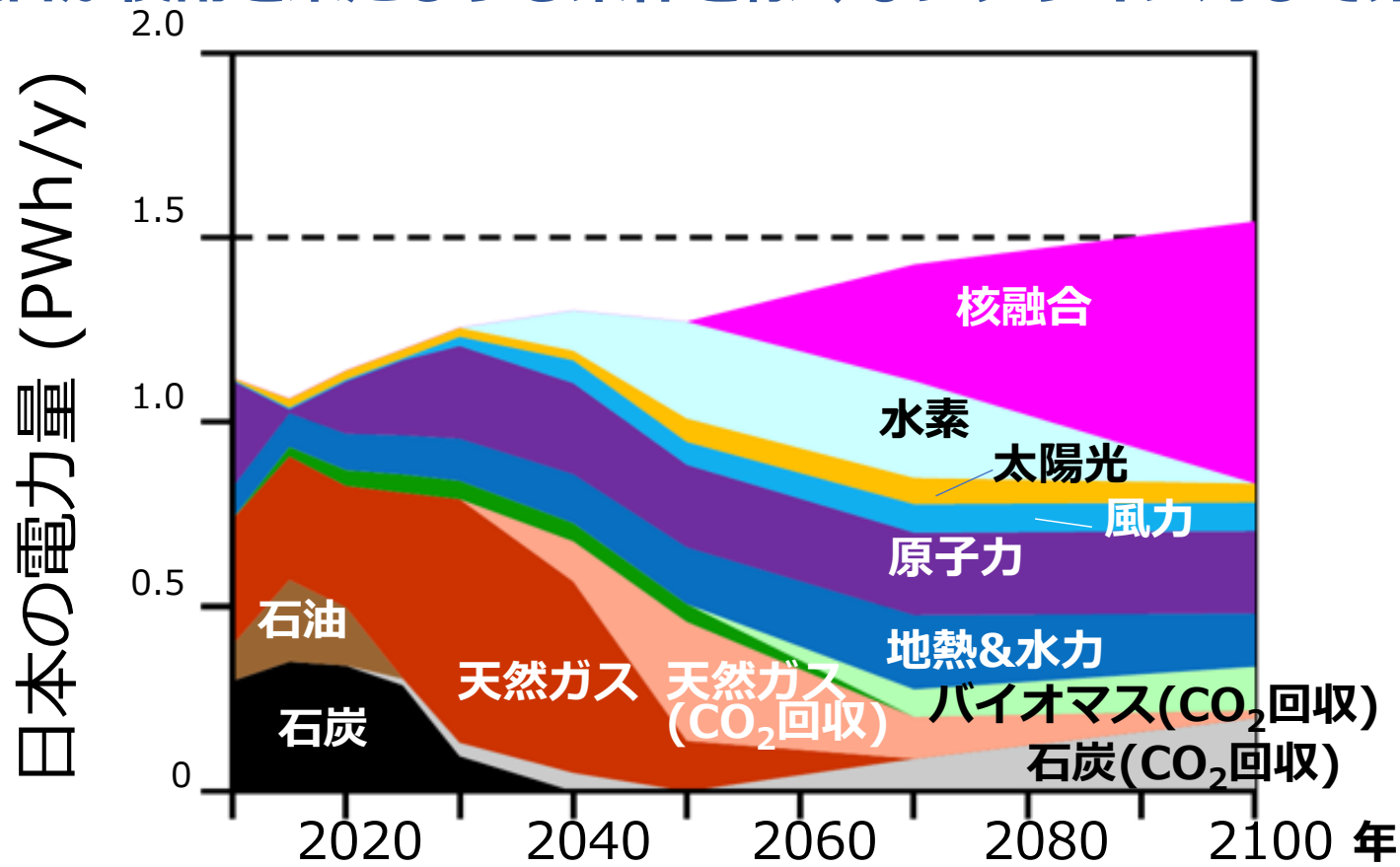
低炭素社会の実現に向けた核融合の役割

Role of fusion energy for low carbon society

パリ協定 Paris Agreement

- 地球平均気温上昇を産業革命以前に比べ 2℃未満に抑制
- 温室効果ガス排出を実質ゼロ

➡ 核融合が役割を果たしうる条件を様々なシナリオに対して分析



(地球環境産業技術研究機構委託研究, H30)

➡ 核融合は、21世紀後半に市場に導入され、重要な役割を果たし得る

無尽蔵で安全、安心な人類究極のエネルギー

Ultimate energy of mankind inexhaustible, safe and secure



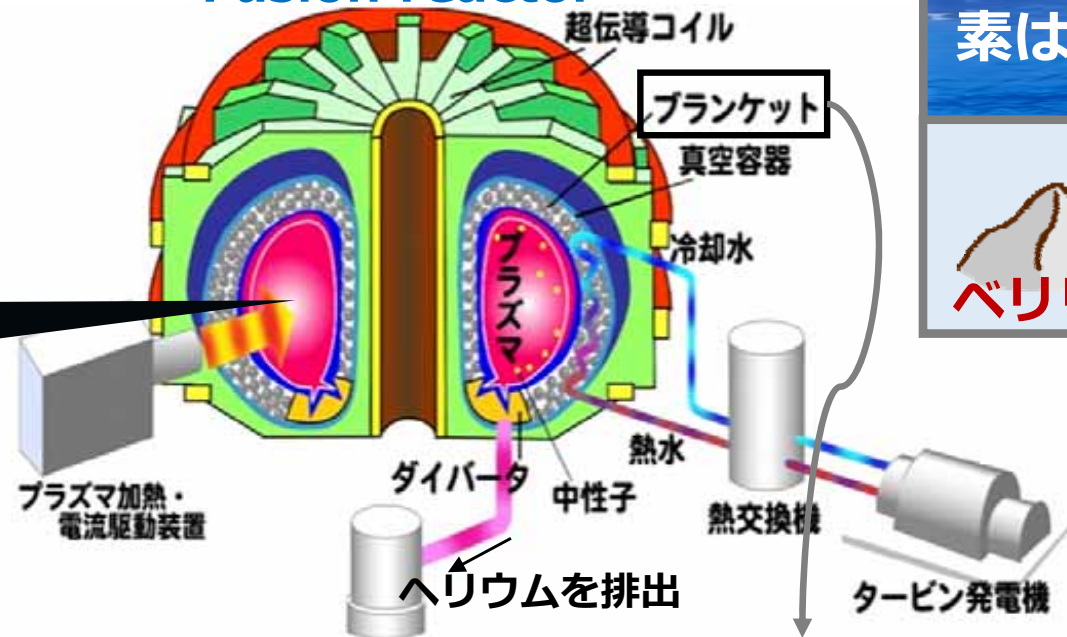
沢山のエネルギー
燃料1g=石油8トン分

$$E = m \cdot c^2$$



核融合炉

Fusion reactor



燃料の資源が豊富

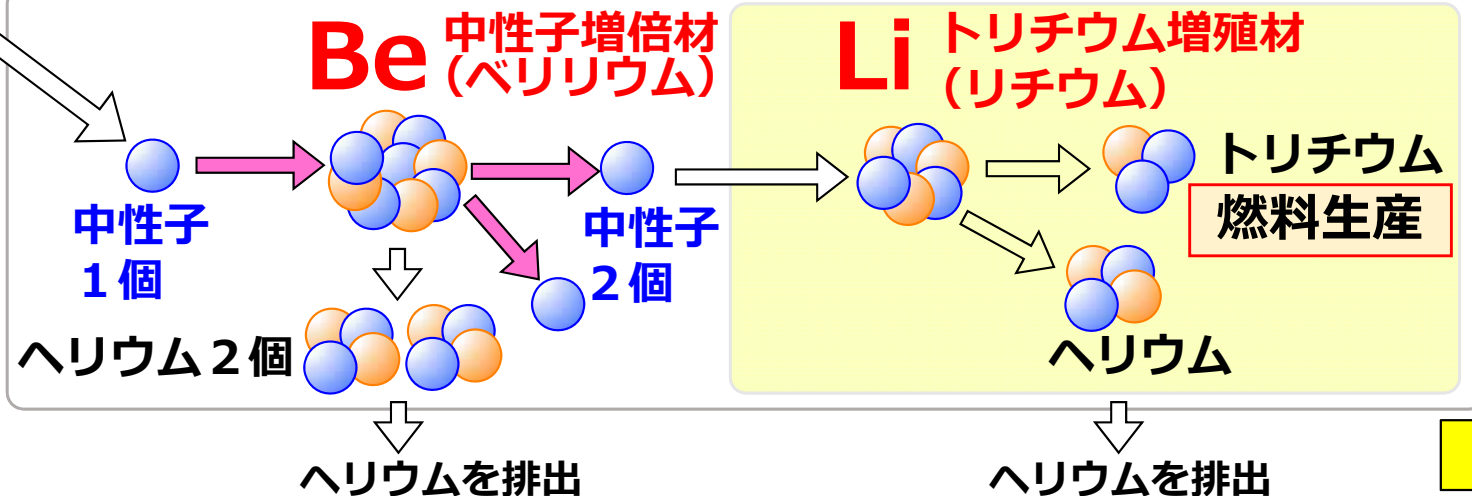
リチウム、重水
素は海に

ベリリウムは陸に

プラズマ



環境に優しく安全



核融合炉発電（原型炉）への開発の道筋

Roadmap of development towards DEMO reactor

試験装置

Test device

科学的実現性

JT-60



超高温プラズマ
の実現

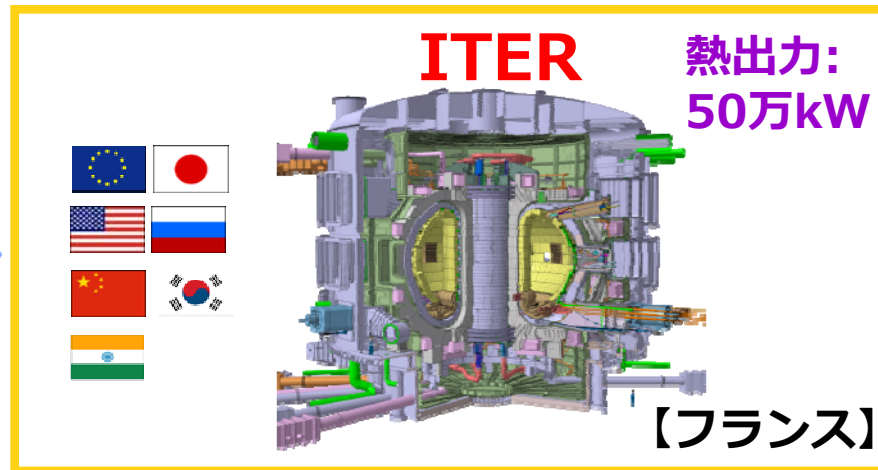
世界最高イオン温度
5.2億度を達成

現在

実験炉

Experimental reactor

核融合燃焼の実証



熱出力:
50万kW

【フランス】

- ブランケット試験体(ITER-Test Blanket Module)計画
- 核融合中性子源A-FNS(Advanced Fusion Neutron Source)計画

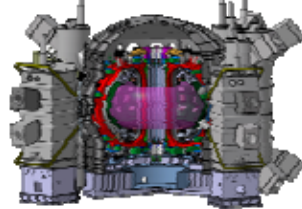
ITERを支援する

ITERでできないことを補う



幅広いアプローチ活動 Broader Approach (BA) activities

【茨城 那珂研】



サテライト・トカマク計画事業
(JT-60SA)

【青森 六ヶ所研】



IFERC事業
スーパーコンピュータ
遠隔実験



IFMIF/EVEDA事業
世界最大電流の
加速器開発

国際核融合エネルギー研究センタ
IFERC: International Fusion
Energy Research Center
国際核融合材料照射施設/工学実証
工学設計活動IFMIF/EVEDA:
International Fusion
Material Irradiation Facility
/Engineering validation and
Engineering Design Activity

核融合炉研究最前線

Forefront of Fusion Reactor Development

オールジャパン体制で原型炉設計を推進

DEMO design activities with all Japan team

原型炉設計合同特別チーム

Joint Special Design Team for Fusion DEMO

産学協同のオールジャパン体制

2020年11月現在のメンバー数： **117名**



- 慶應義塾大
- 上智大
- 東京大
- 東京工大
- 早稲田大



六ヶ所村を拠点

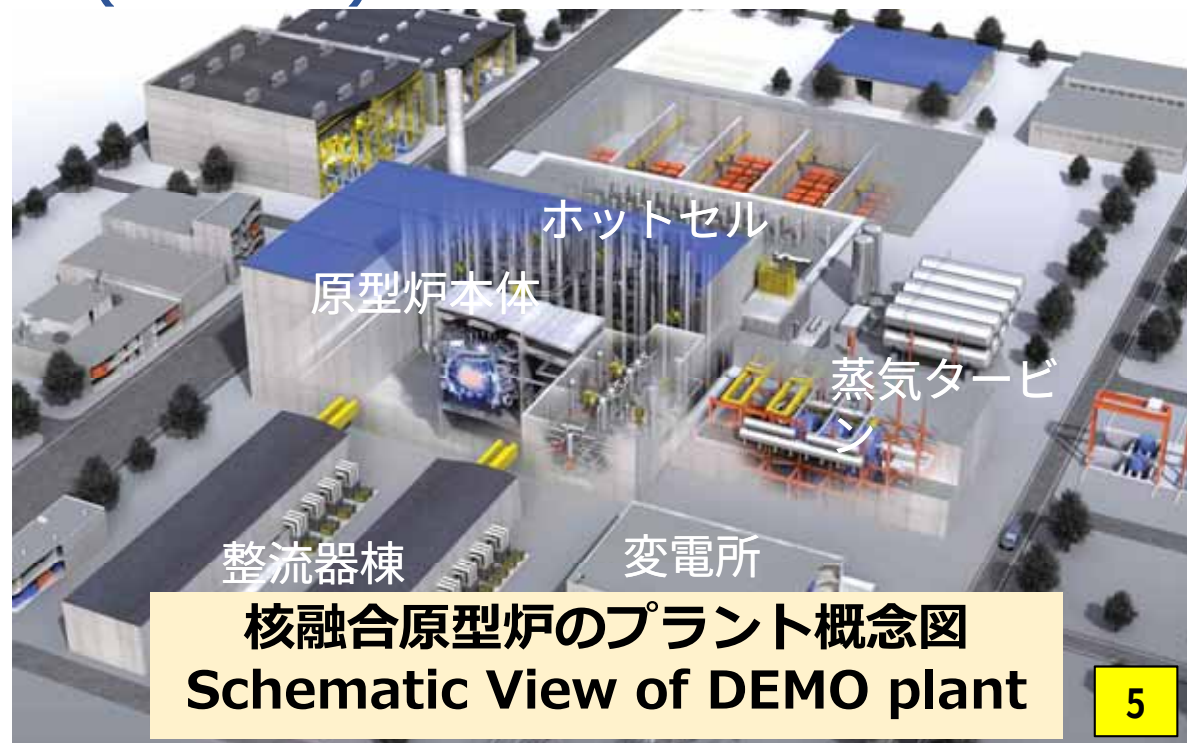
- 茨城大
- 筑波大
- 東北大
- 物材機構
- 量研

- アイジェブリッジ
- 金属技研
- 東芝エネルギーシステムズ
- 日立製作所
- 古河電気工業
- みずほ情報総研
- 大和システムエンジニア

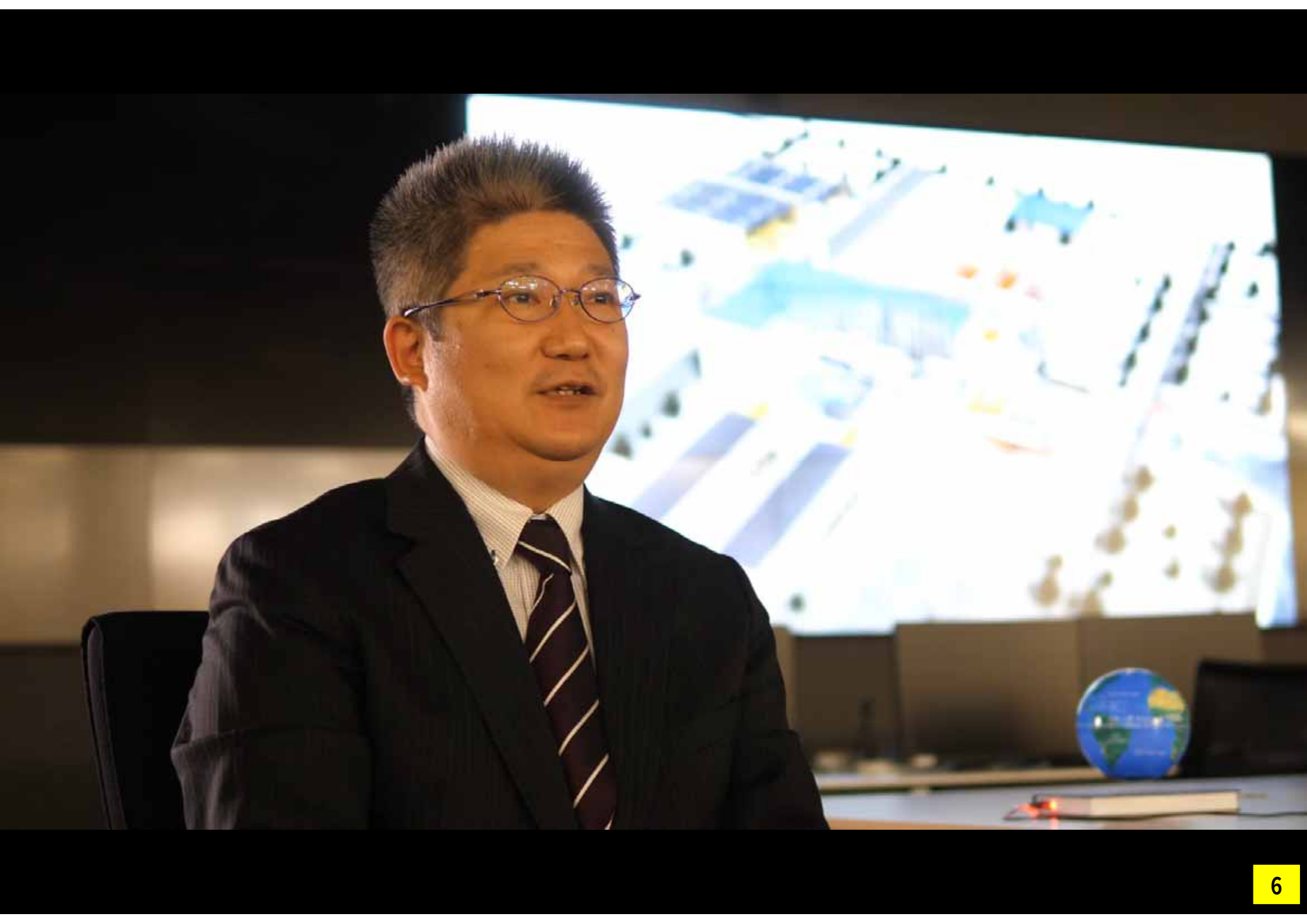
- 核融合研
- 名古屋大
- 静岡大
- 信州大
- 富山大
- 福井大
- 福井工大
- 九州大
- 大阪大
- 京都大
- 近畿大
- 三菱重工
- 三菱電機
- 摂南大
- 同志社大
- 鳥取大



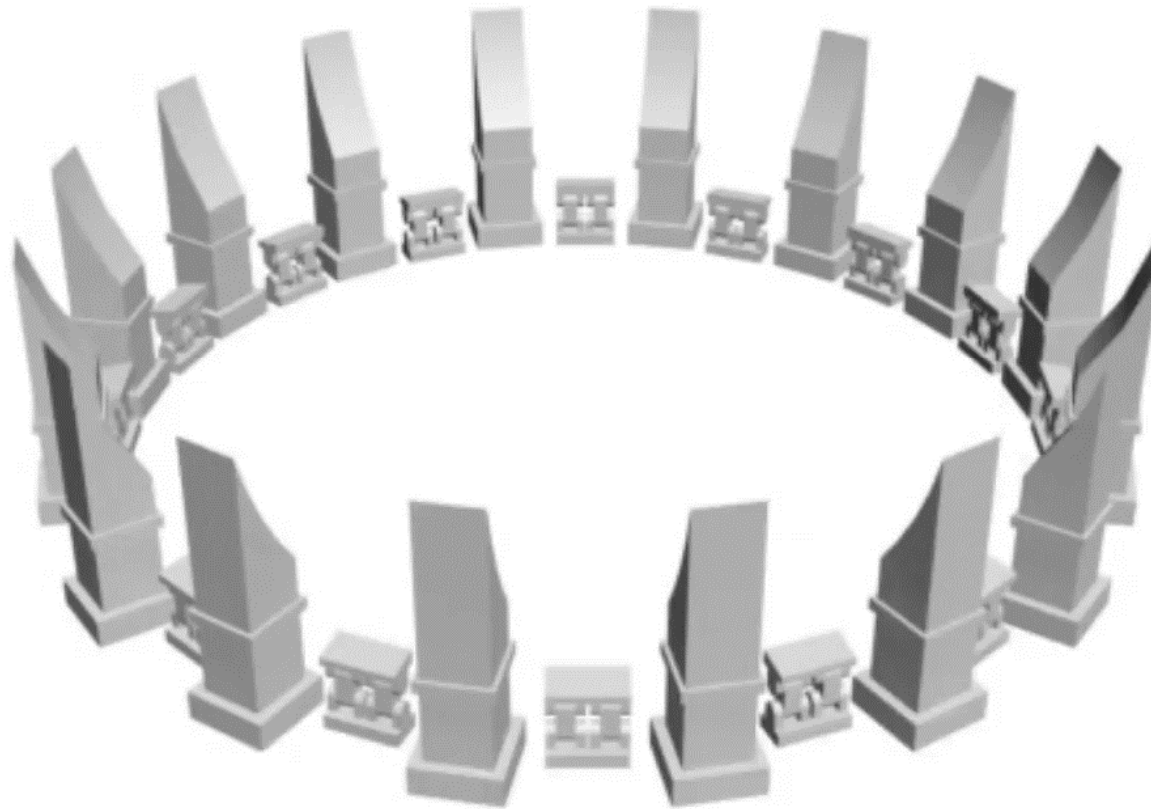
第11回原型炉設計合同特別チーム全体会合
(2019.12)



核融合原型炉のプラント概念図
Schematic View of DEMO plant

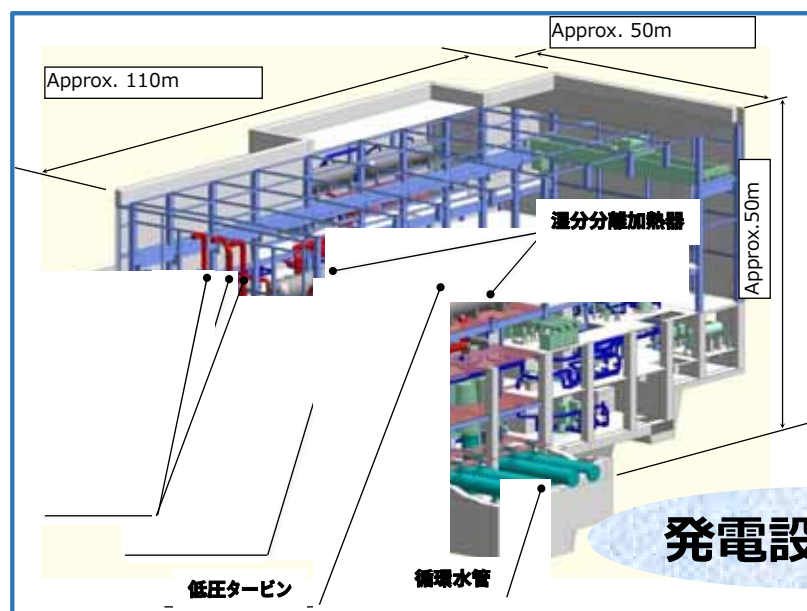


原型炉の組み立てと施設の全体配置

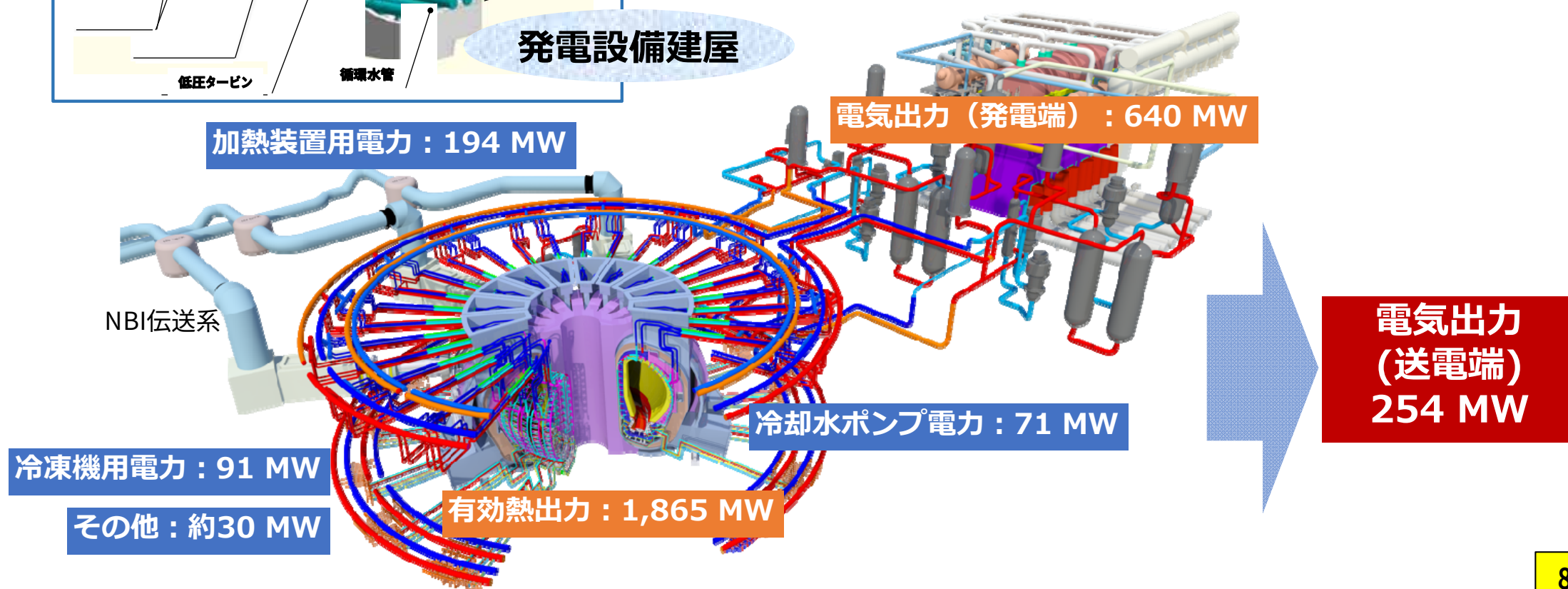


原型炉概念を明確化し、概念設計を推進

Clarifying DEMO concept towards finalizing conceptual design



- ITERの技術基盤に、産業界の発電プラント技術や運転経験等を取り込み、プラントの全体像を構築
- 正味電気出力を、**約25万キロワット**と評価
- 21世紀中葉に発電実証を行うための**日本独自の原型炉の基本概念**を明確化
(令和元年11月26日、プレス発表)



原型炉に向けた大きな技術課題：

ブランケットで核融合エネルギーを取り出す技術の創出

Creating technology to produce energy and fuel in blankets

熱エネルギーと燃料生成の実証へ

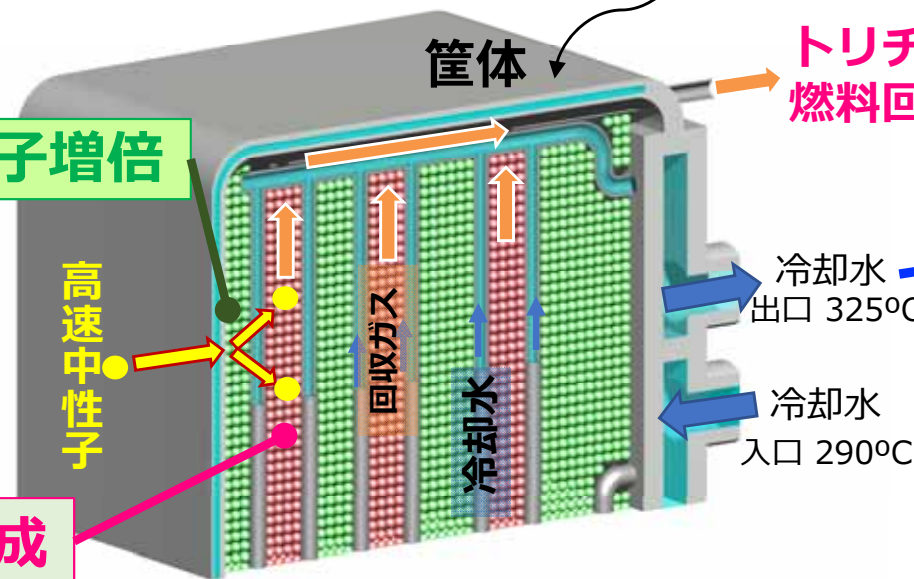
- プラズマからの高速中性子が衝突し、冷却水を加熱
- 発生した中性子を増倍(ベリリウム)し、トリチウム燃料を増殖(リチウム)

ブランケット材料の耐久性検証へ

- 高速中性子が当たると材料の性質が徐々に変化
- もろくなる、別の元素に変わりヘリウム等が発生

ベリリウムで中性子増倍

リチウムで燃料生成



ブランケット概念図

トリチウム(三重水素)を
燃料回収へ

冷却水
出口 325°C

冷却水
入口 290°C

熱エネルギーを発電へ

ITERへブランケット試験体を持ち込む
試験を準備 (ITER-TBM計画を実施中)

大電流加速器を用いた連続運転の大強度
中性子源を計画中 (A-FNS計画を検討)

ITERでブランケット試験体の性能試験を行う

Validating a blanket test module (TBM) using ITER



安全性・総合機能

1号機製作

ITERサイト

受入/据付

健全性
試験

2号機製作

ITERサイト

受入/据付

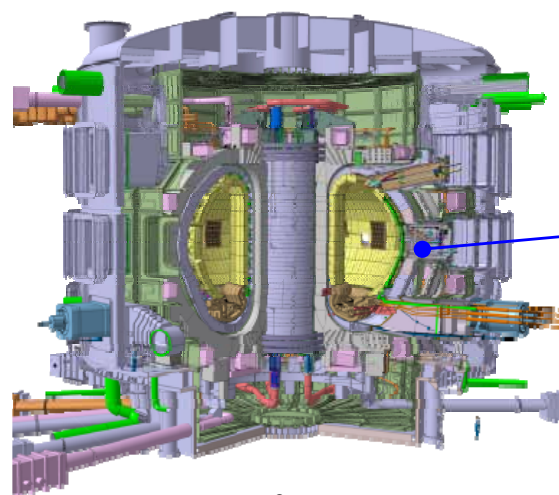
燃焼試験

ブランケット工学試験棟：
ITER運転条件での安全実証試験

完成予想図(2021年,竣工予定)

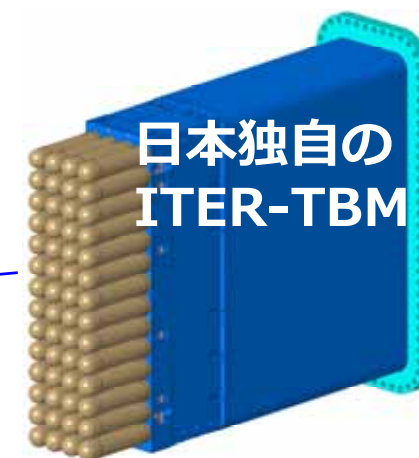


六ヶ所研

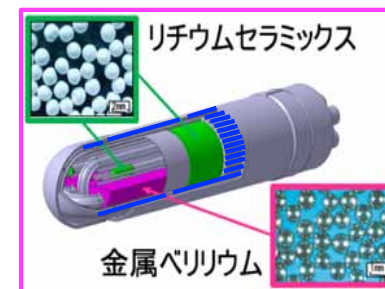


ITERはパルス運転：
400秒、30分間隔

TBM用試験ポート：
2ポート、4箇所



日本独自の
ITER-TBM



ブランケット工学試験棟を六ヶ所研に建設中



六ヶ所核融合研究所

Rokkasho Fusion Institute

ブランケット工学試験棟（建設中）

共同研究棟

原型炉R&D棟

計算機・遠隔実験棟

管理研究棟

IFMIF/EVEDA開発試験棟

ブランケット材料検証のための中性子源が必要

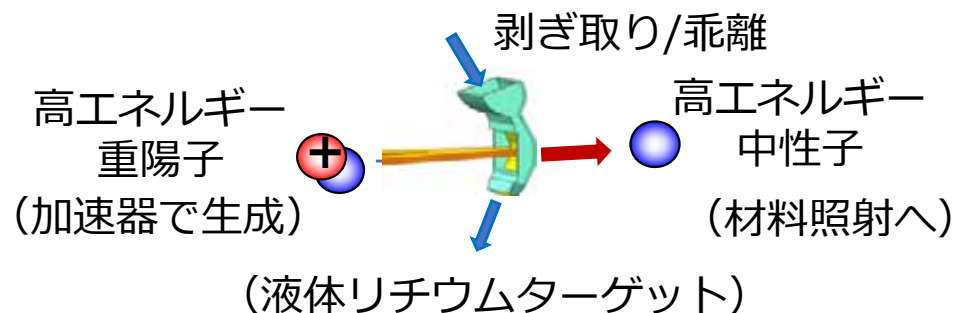
Needs of Fusion Neutron Source for validating blanket materials

課題：原型炉の建設には、核融合反応と同じエネルギー・同じ量の中性子を材料に当て、材料特性の耐久性検証が不可欠。

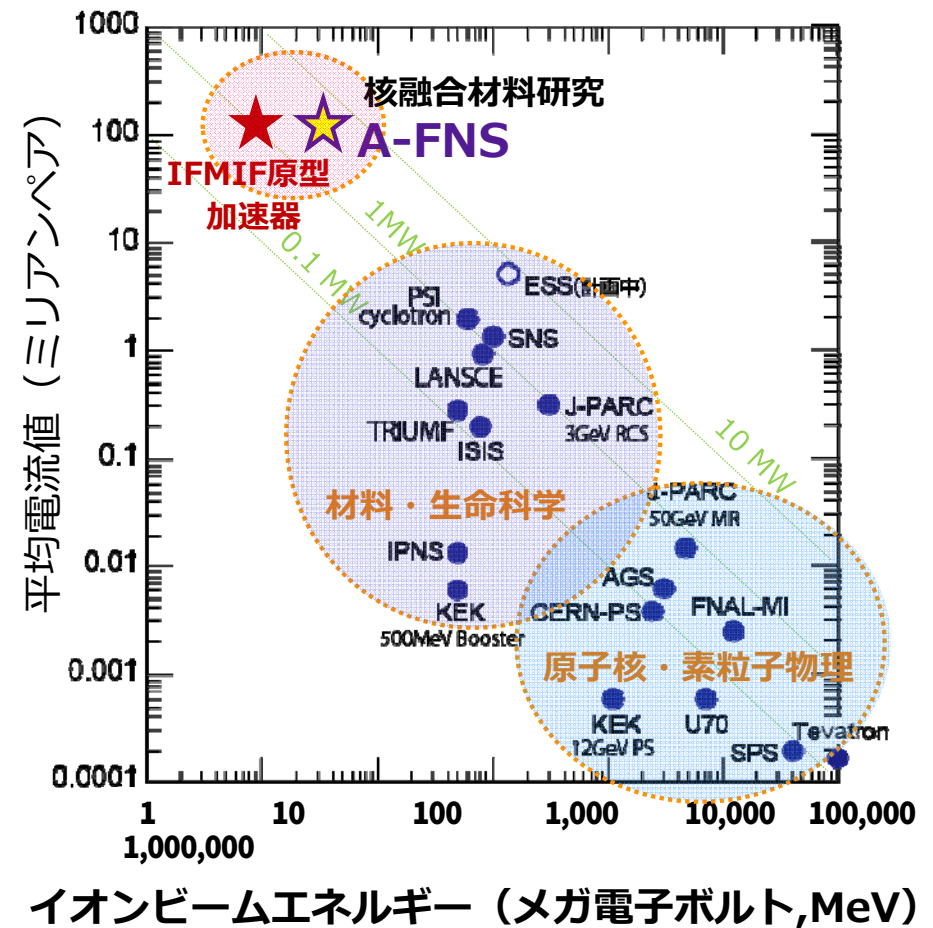
原子炉・・・・・・・・発生する中性子の
エネルギーが低い
既存の中性子源・・パルスのため発生する
中性子積算量が少ない



連続運転の大強度中性子源の開発が必要
重陽子ビームを液体リチウムに当て、
高エネルギー中性子を連続的に生成し、
材料へ照射

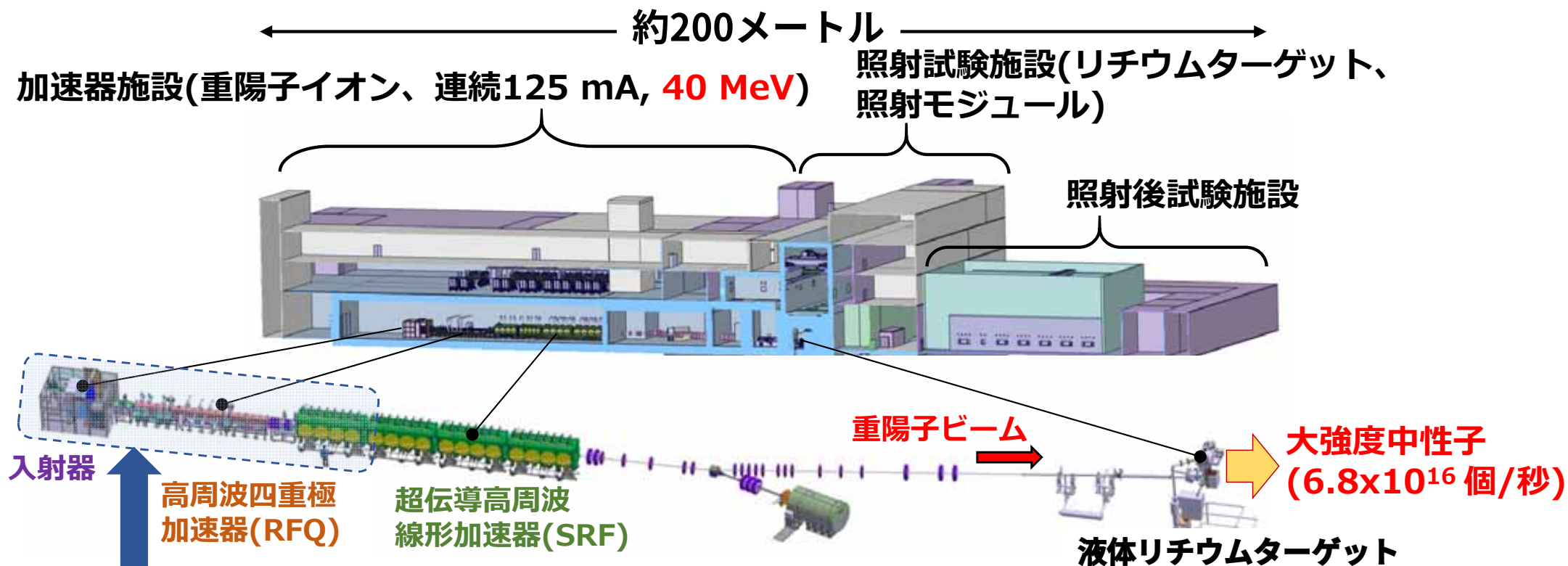


前人未到の目標をミッションとする
核融合中性子源A-FNSの実現へ：
電流値125mA、40 MeV、連続運転



核融合中性子源A-FNSの概念を構築

Structuring concept of Advanced Fusion Neutron Source (A-FNS)



生成した大量の中性子を、**核融合材料照射**と同時に、様々な**中性子利用**に応用できる施設として**A-FNS**の概念を構築



BA活動のIFMIF/EVEDA(国際核融合材料照射試験施設/工学実証工学設計活動)事業にて、**IFMIF原型加速器 (LIPAc : Linear IFMIF Prototype Accelerator)**を日欧共同で開発し、実証試験を実施

IFMIF原型加速器の実証試験を実施

Validating Linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc)

2019年7月

高周波四重極
加速器(RFQ)
重陽子ビーム
パルス運転実証



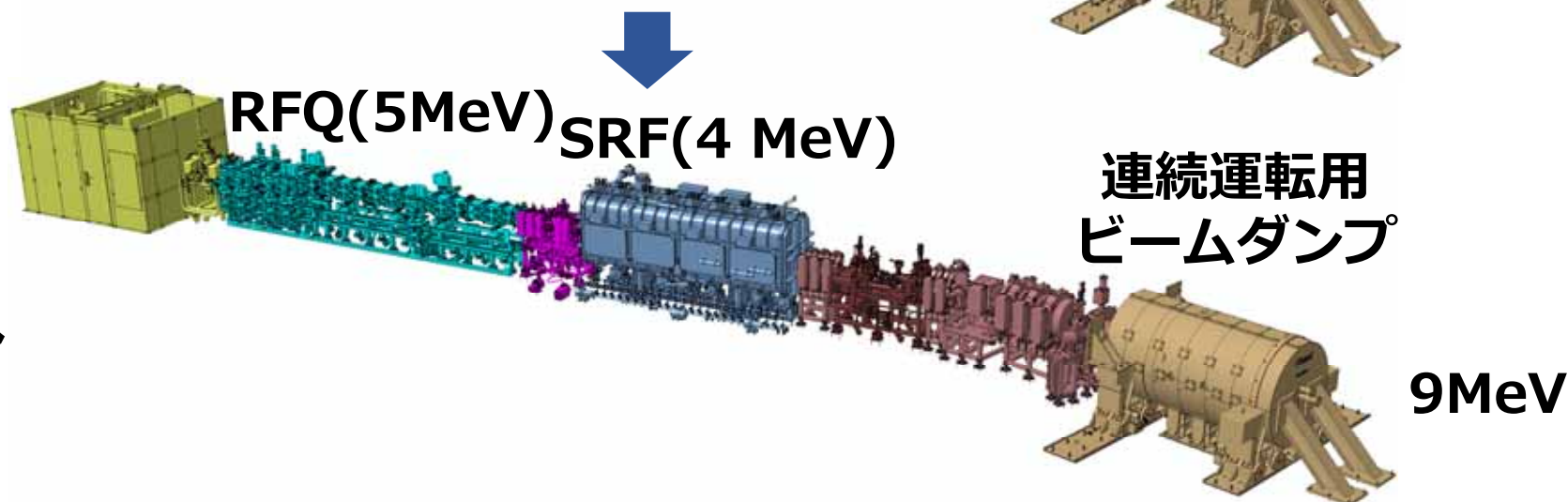
2020年度～

高周波四重極
加速器(RFQ)
連続運転実証へ



2021年度～

超伝導高周波
加速器(SRF)
を組立て、実証へ



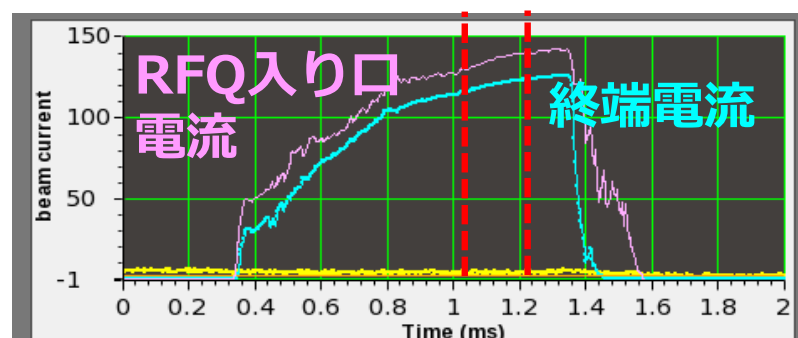
世界最長の8系統高周波四重極加速器(RFQ)

入射器

RFQ 9.8メートル

低出力
ビームダンプ

LEBT ACCT	MEBT ACCT	DPLATE ACCT	LPBD
141.687 mA	126.878 mA	126.305 mA	125.053 mA



2019.7.24 5 MeV, 125mA、重陽
子ビーム加速に成功(プレス発表)







加速器室の様子



原型加速器データの欧州への転送システムを構築

Building data transfer system of LIPAc to Europe

- 加速器の試験調整に、
- 欧州から遠隔参加できるように、
- 六ヶ所研のITER遠隔実験センターで開発した技術を活用し、
- **原型加速器データを実時間で欧州へ転送できる通信システムを構築**
(2020年10月、プレス報道)



六ヶ所研に新たに整備した原型加速器遠隔実験室



実時間で欧州へデータ転送

➡ コロナ禍で一層威力を発揮



欧州（ドイツ、F4E）



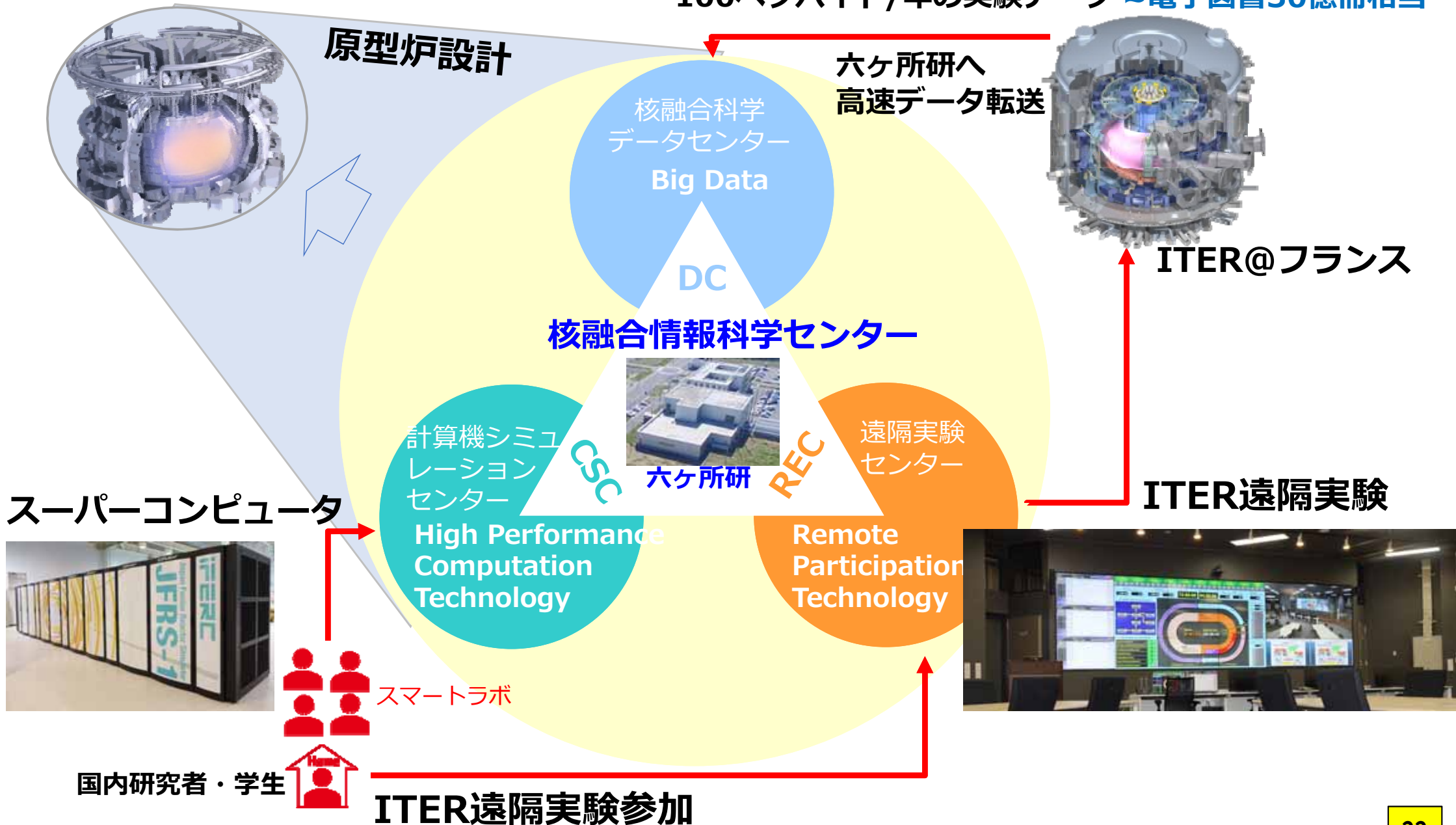


LIPAC遠隔実験室

核融合情報基盤構築から核融合情報科学センターを構想

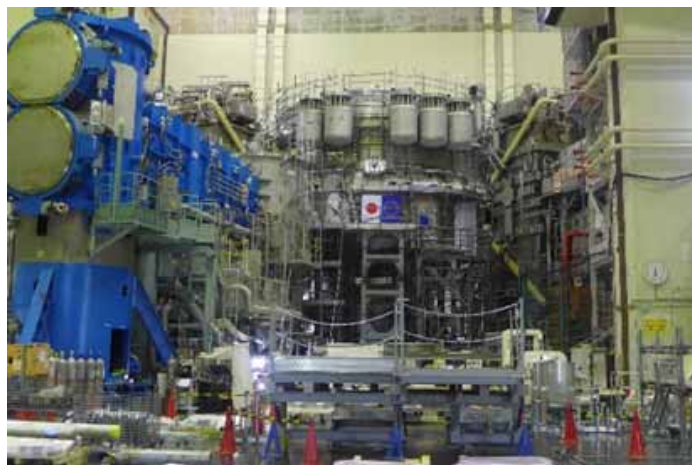
Envisaging Fusion Information Science Center

100ペタバイト/年の実験データ ≈ 電子図書30億冊相当



核融合エネルギーの実現に向け 光・デジタル関連研究開発の産学連携を加速

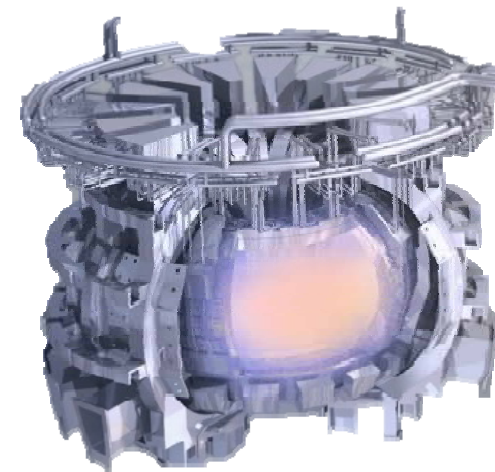
Accelerating industry-academia collab. of optical digital technology



JT-60SA (那珂研)



スーパーコンピュータ及び核融合原型炉設計 (六ヶ所研)



NTTとQST連携協力協定の締結(2020.11.6)
NTT-QST collaboration agreement signed in Nov. 2020



澤田NTT社長と平野QST理事長

- 光・デジタル技術と核融合技術の融合による**革新的なネットワーク技術**
- 革新的な光・デジタル技術による**新しい核融合エネルギー分野の開拓**

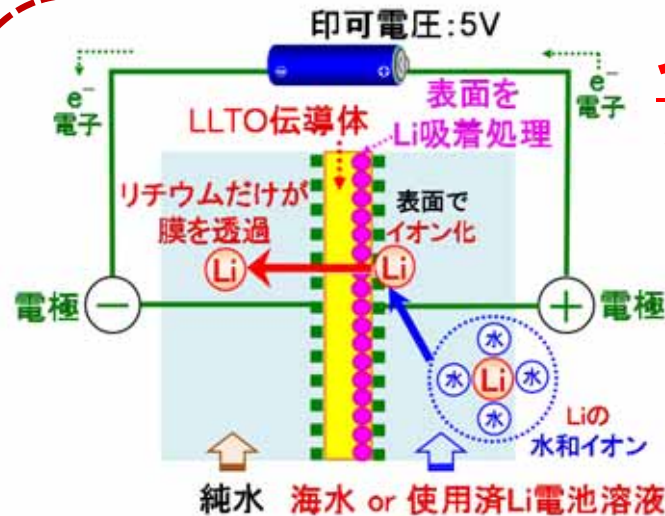
- 核融合炉からの膨大な観測データの**リアルタイムな収集・分析方式**とこれを活用する**高度な核融合炉制御方式**
- 核融合炉を**サイバー空間上にリアルに再現する方式**とそれを駆使した**プラズマ予測制御方式**

産業応用ポテンシャル

Industrial application potential

リチウムの確保戦略と産業応用

Strategic Securing of Lithium resources and Industrial application



イオン伝導体リチウム分離法*の発案

*LiSMIC (Li Separation Method by Ionic Conductor)
イオン伝導体をLi分離膜とし、Liのみを選択的に回収する技術

表面Li吸着処理で
電流値約850倍

基盤研究段階

パイロットプラント段階

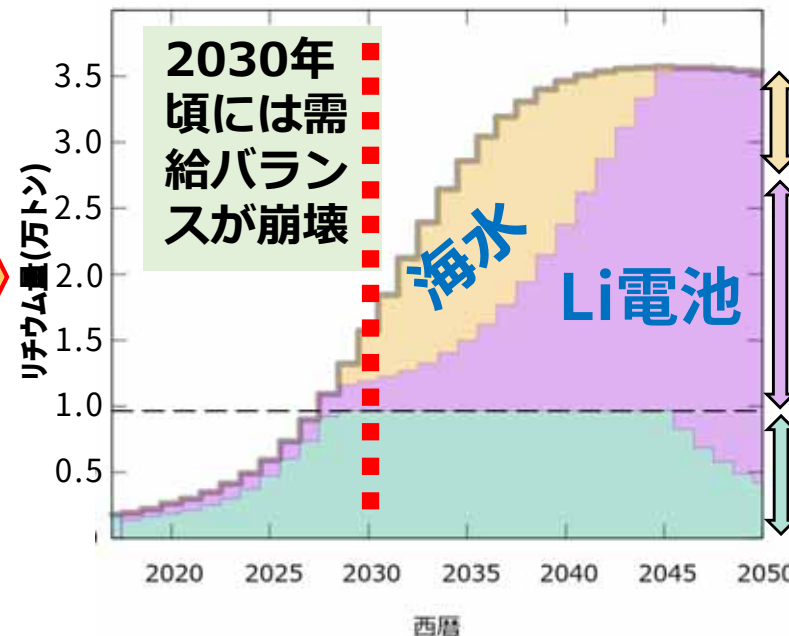
海水からリチウムのみを透過させる革新的技術の開発に成功

IEA "Global EV Outlook 2019"より 日本のLi需要を算出

- 日、米、中、欧：
- ・電気自動車(EV)
 - ・プラグインハイブリッド車



車載用リチウム電池
の需要急増



ギャップ

= 海水からLi確保

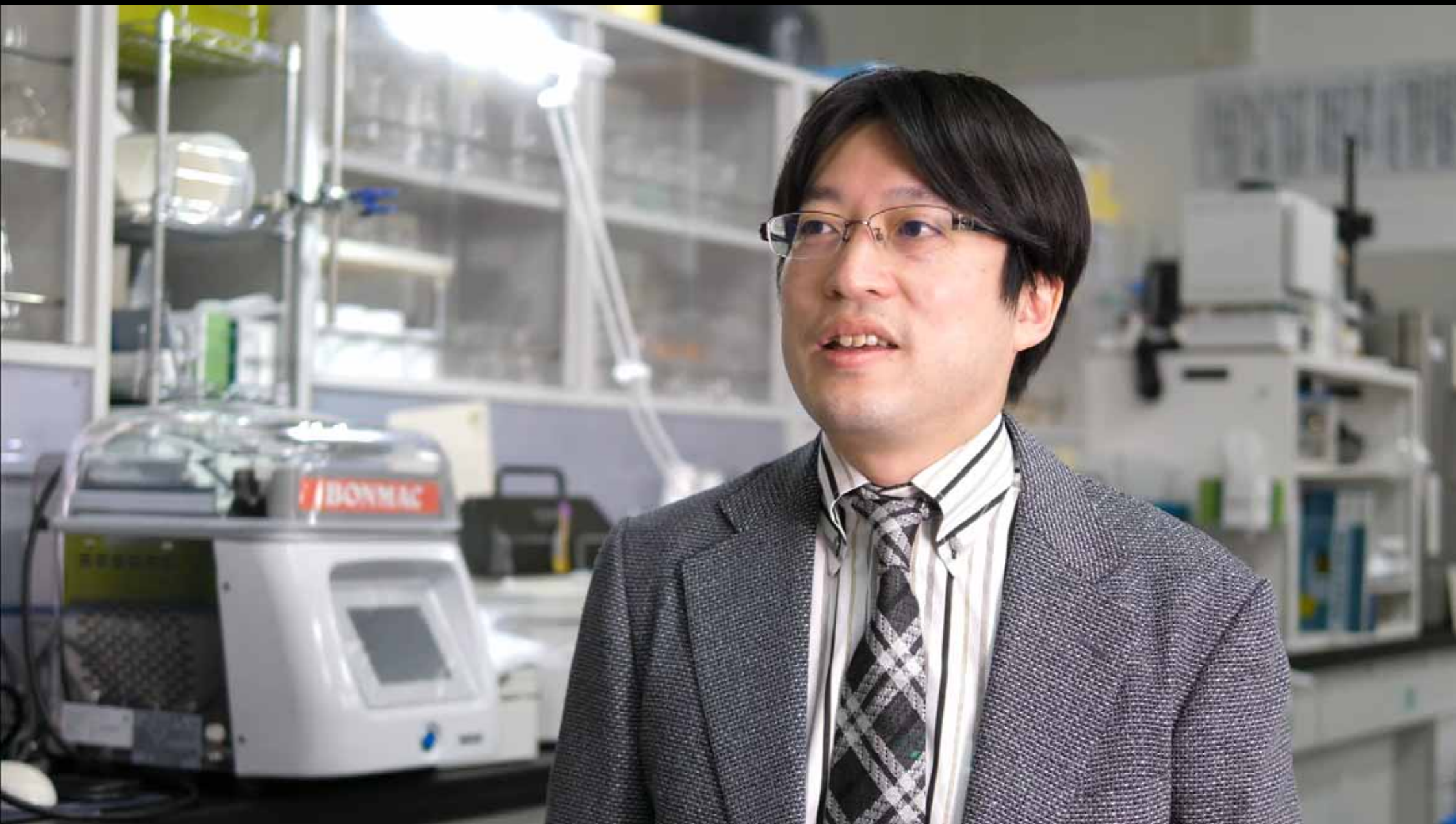
需要増加分

= イオン伝導体分離法(LiSMIC)によるリサイクル (リサイクル率90%想定)

輸入

= 現在のシェア (10%)を維持

海水・Li電池・塩湖かん水からのLi回収を通じて脱炭素社会の実現へ貢献



リチウム回収実験はどのように行われているか



リチウム電池や塩湖かん水への応用により実用化を加速

Accelerating R&D with JOGMEC and START projects for social implementation

使用済リチウム電池のリサイクルコストを評価

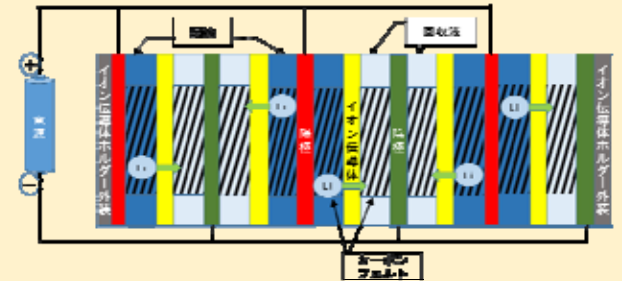
← JOGMEC石油天然ガス・金属鉱物資源機構
公募型委託研究



Li電池からのLi回収技術の実用化を目指すQSTアライアンス



- イオン伝導体をマルチ化(20枚)し、年間数kg規模でコスト評価



塩湖かん水からのリチウム回収技術を開発

← JST科学技術振興機構
公募型STARTプロジェクト

- ・ 課題：従来「塩湖かん水」の天日干しで年単位の期間を要した
- ・ 対策：LiSMIC法により塩湖かん水からの回収を工業化（量産化）

 Universal Materials Incubator Co.,Ltd.

事業プロモータUMIと共にリチウム回収ベンチャーの設立を目指す



ベリリウム資源確保の必要性

Needs of beryllium resource securing

- 核融合炉への初期装荷に約300トン必要
- Be資源の調査により埋蔵量は豊富（48万トン）
- Beは軽量かつ高融点・高剛性といった特性を有し、安定性の高い材料として最先端分野(構造体、合金材料、電子材料、鏡、等)で必要

しかし、

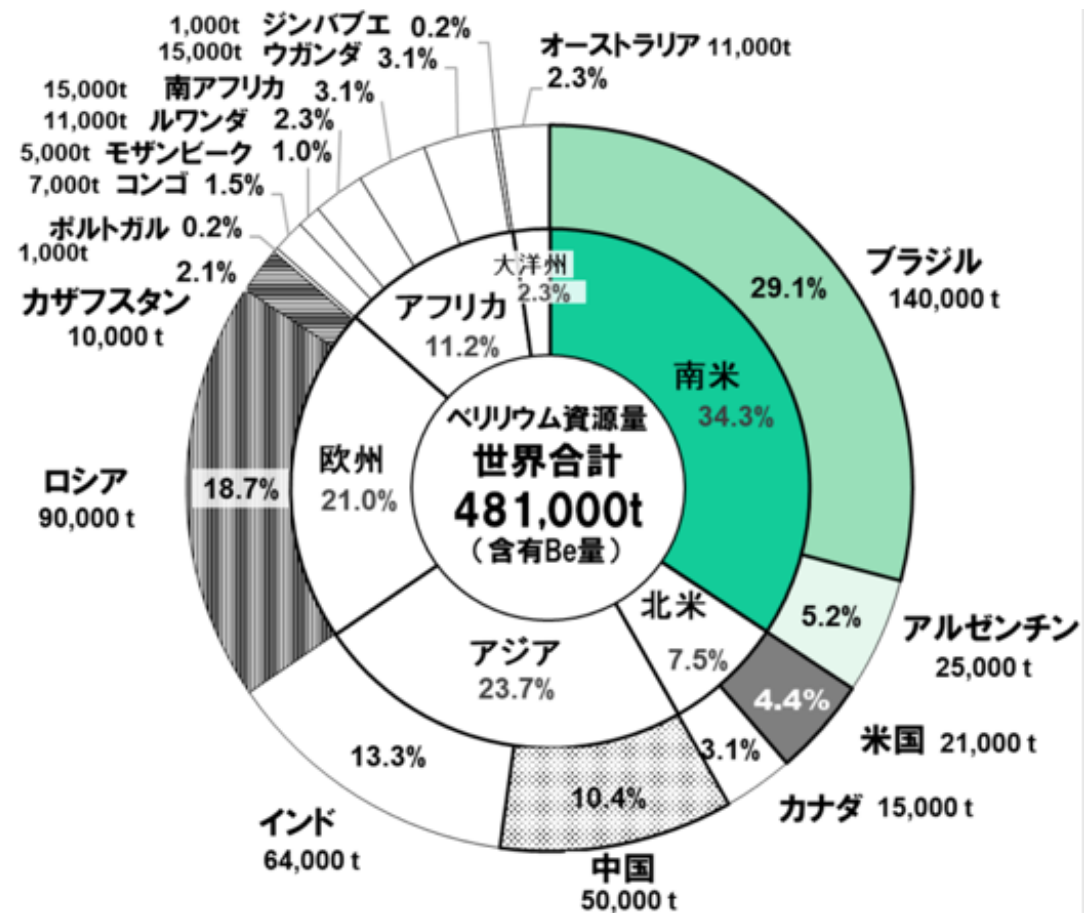
- Be生産量は世界で約300トン/年
- 米国が90%近くのBe市場を寡占している状況（コスト高）

したがって、

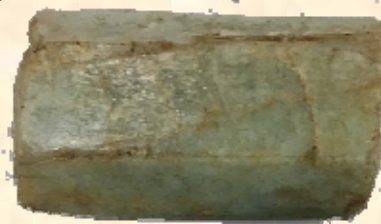
- 核融合炉建設に向け、ブラジル等の国々から資源調達する戦略が重要



ベリリウムの安定確保に向け、経済性・安全性に優れた新たな精製技術の開発へ取り組んだ



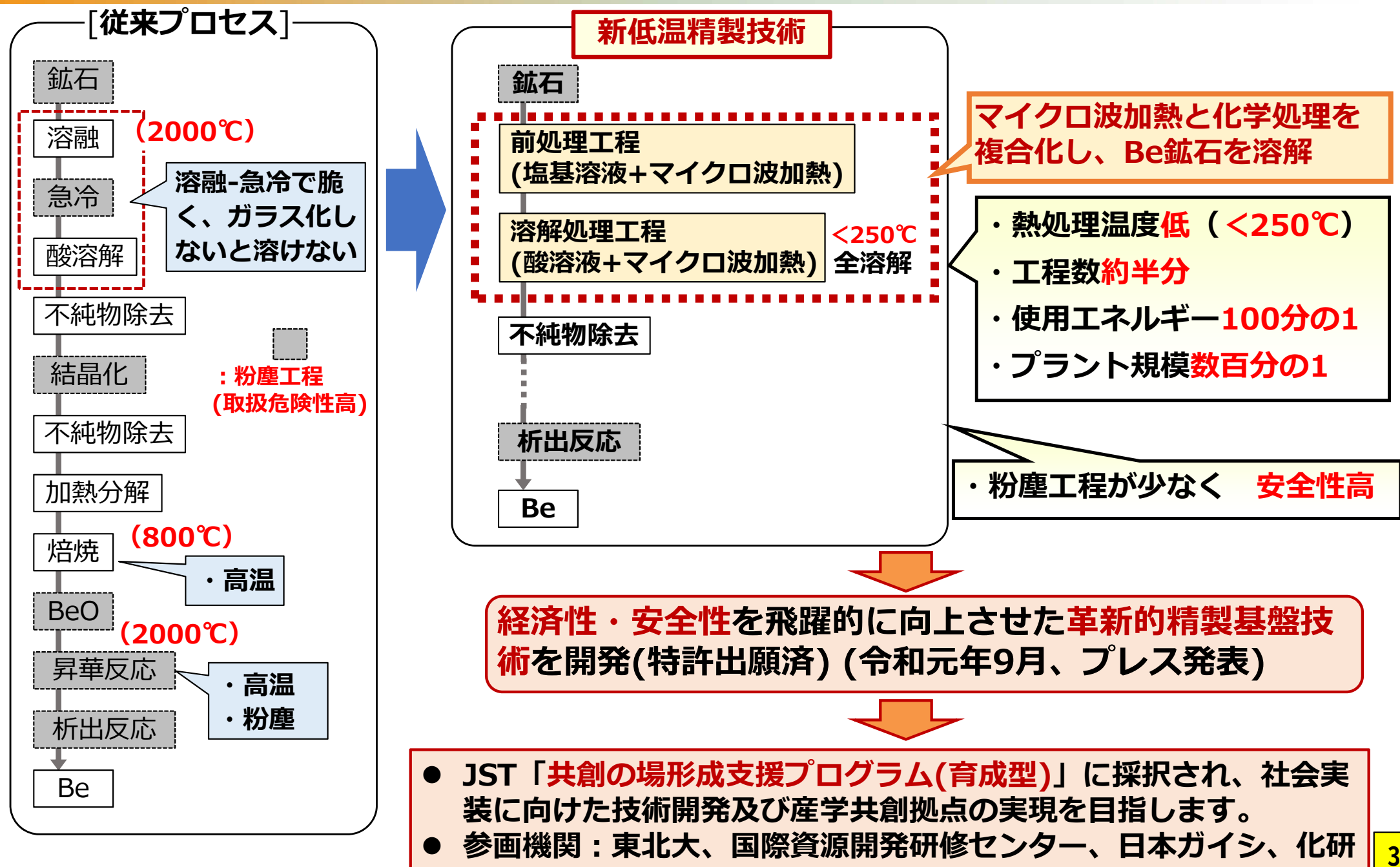
(三井金属資源開発, H30)



ベリリウム鉱石（緑柱石）：
エメラルドやアクアマリンの
原料

新しいベリリウム精製技術の創出と産業応用

New beryllium refining technology and industrial application





ベリリウム鉱石の溶解はどのように行われているか

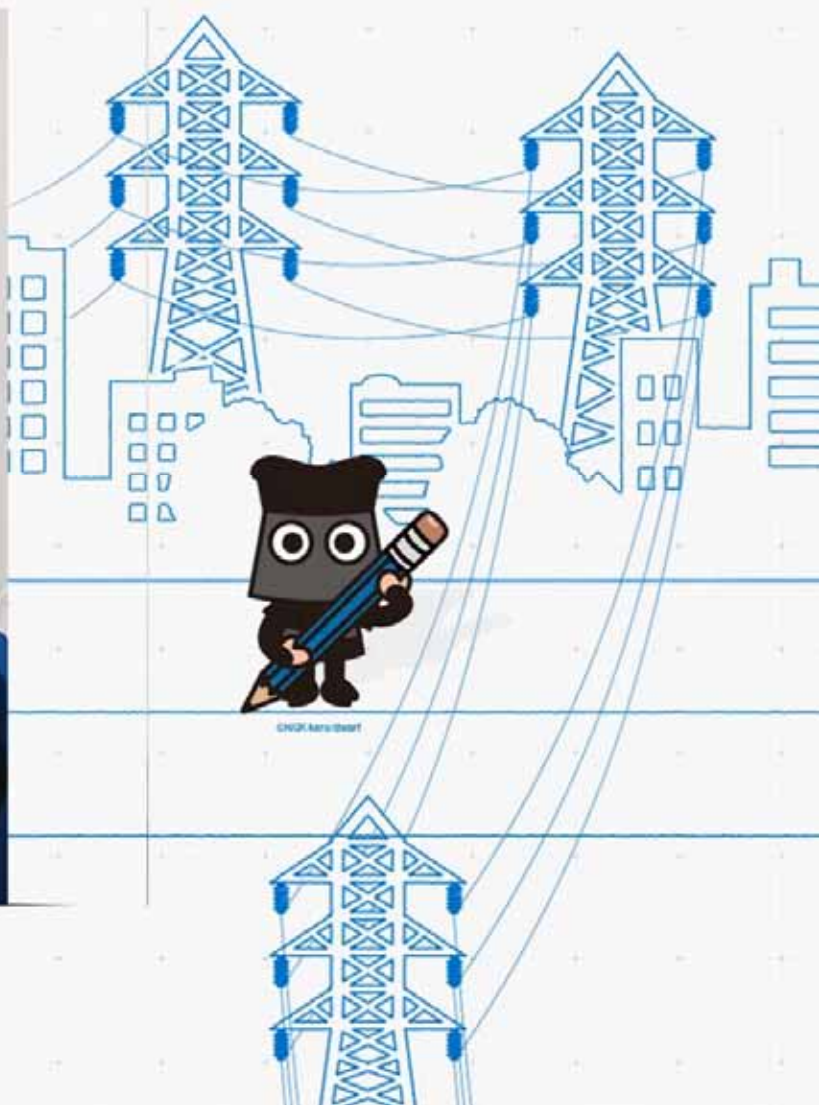


省エネ・CO₂削減の革新的精製・リサイクル技術により ベリリウム等の金属資源循環型社会の実現に貢献





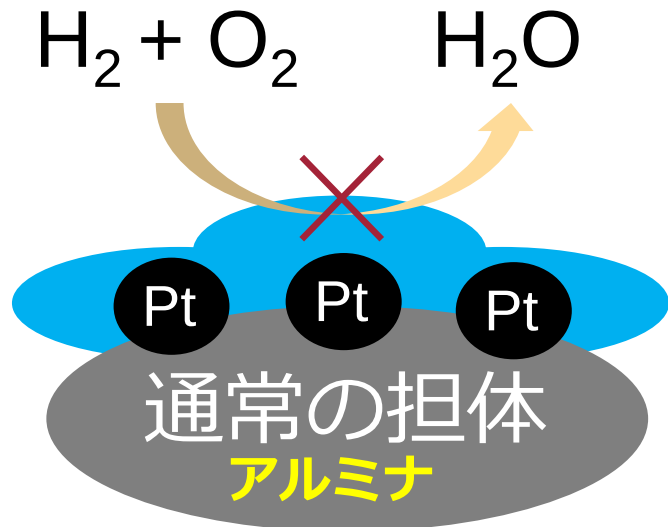
日本ガイシ



トリチウム(三重水素)の取扱いは、水素爆発災害等から核融合施設を守る安全性確保の要
✓ トリチウム**ガス**を「**触媒**で酸化処理」し、核融合施設に**水**としてトリチウムを閉じ込める

しかし、

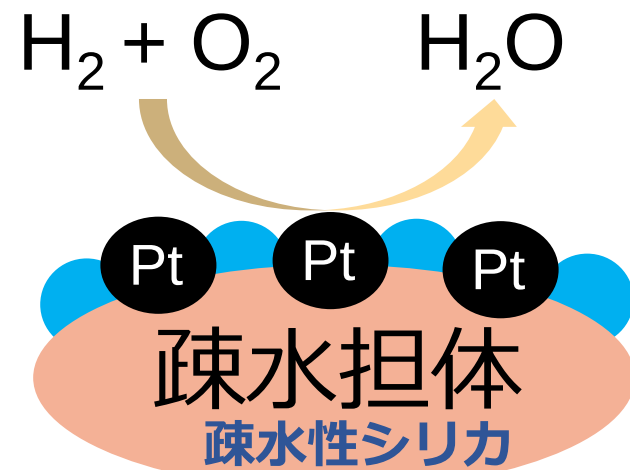
トリチウムを酸化する従来触媒の弱点



触媒である貴金属粒子（白金Pt等）が**水蒸気によって被覆**され
→室温では触媒反応が次第に**低下**
→水の膜の除去のため**加温**が不可欠

そこで、熱に強く、燃えにくく、放射線にも強い

無機物を使った疎水性触媒の開発に挑戦



【着目】**疎水化**すると、触媒表面は水の**接触面積が小さくなる**こと
【工夫】**シラン処理**(無機物と有機物を接着させる処理)を適用、**無機物**の触媒担体を**疎水化**





触媒の元となる無機材料

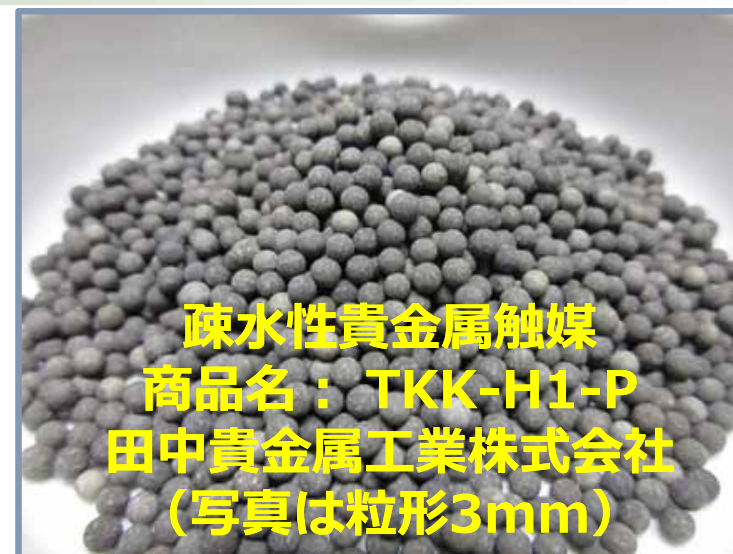
疎水性貴金属触媒の商品化と広がる産業応用

Commodizing of innovative catalyst and broadening industrial application

無機物質を疎水化処理した新たな触媒製造法により、**加温せず触媒反応を維持できる疎水性貴金属触媒**を田中貴金属工業株式会社と共同開発、特許取得済 →商品化

〔触媒関連での先進技術の開発に与えられる
「触媒工業協会技術賞」を令和2年度に受賞〕

産業応用



今後、用途別に製造法を最適化し商品ラインナップへ貢献

水素エネルギー社会

水素取扱い施設の水素爆発
未然防止装置



(写真) 出光興産・成田水素ステーション

一般工業への適用

水や水蒸気に関係する
化学反应用触媒
水素同位体分離用触媒



原子力分野

原子炉の格納容器内可燃性
ガス処理設備向け触媒



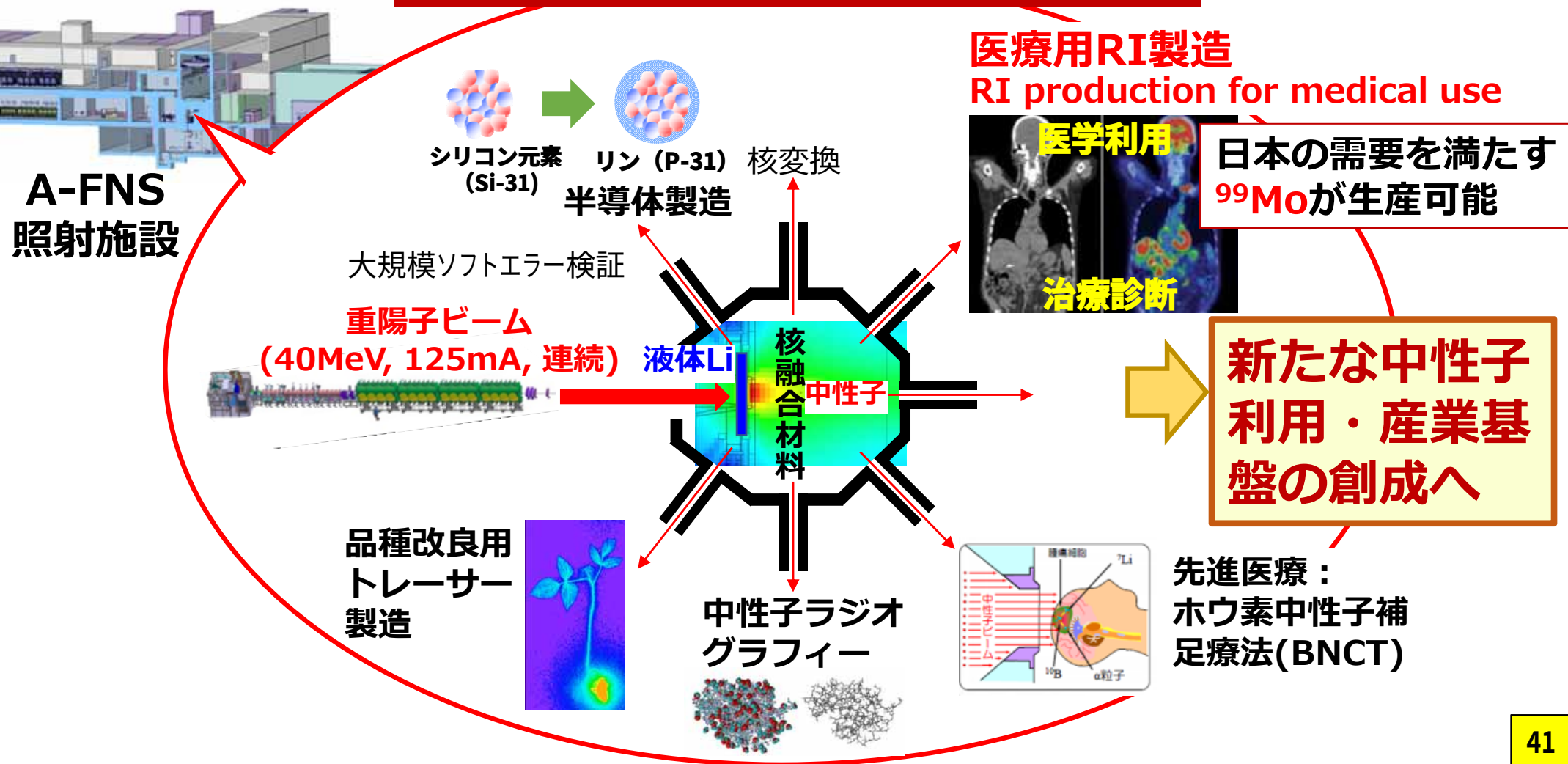
A-FNS : 核融合と産業応用の両立を目指して

Aiming to use for both fusion and industrial applications

日本の医療用放射性同位元素(RI)供給 ➡ 海外輸入依存のため安定供給が課題

- 特に、核医学診断用の**テクネチウム-99m**は、その親核種である**モリブデン-99**を全量輸入に頼っているため、安定供給が大きな問題

他の分野・産業応用へ展開する照射施設へ



A-FNSから新たな中性子産業基盤の創成へ

Towards new underlying industrial complex for neutron applications

**A-FNSを中核とした中性子利用・産業施設の集積、
そして新たな中性子産業基盤の創成へ**

