

# 加速器駆動核変換システム(ADS)に関する研究開発の現状と将来計画



日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
分離変換技術開発ディビジョン  
辻本 和文

- **分離変換 (P&T : Partitioning and Transmutation) 技術**
  - どんな技術で、何を目指しているか？
- **核変換をどのように実現するか**
  - 加速器を使った核変換技術：**加速器駆動システム(ADS : Accelerator-Driven System)**
  - ADSを中心とした**階層型燃料サイクル**
- **分離変換技術の実現に向けた研究開発**
  - ADS関連研究開発
  - 将来計画(核変換実験施設)
- **まとめ**

## ■ 安全対策の向上

- 今後も原子力発電を利用していくために、必要不可欠な課題。

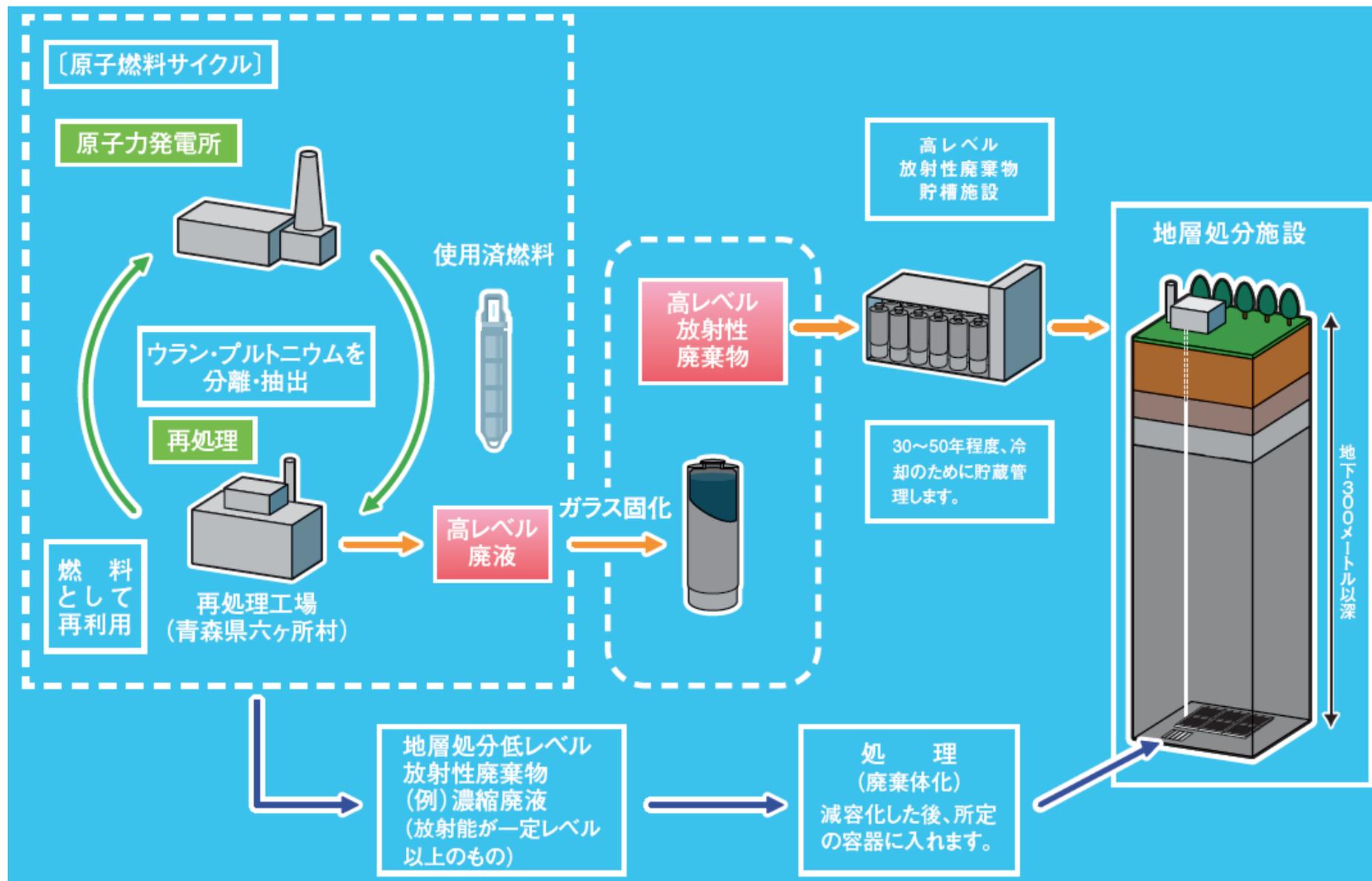
## ■ 高レベル放射性廃棄物の処理・処分

- 高レベル放射性廃棄物を地下深くの安定した岩盤に埋設する地層処分が最も有望。
- 地層処分実現の目途が立っている国は、フィンランドとスウェーデンのみ。
- 我が国では、地層処分の方針は決まっているが、具体的な候補地は決まっていない。

※ 高レベル放射性廃棄物：使用済燃料、または使用済燃料を再処理した後の高レベル廃液を固化したガラス固化体

分離変換技術とは：

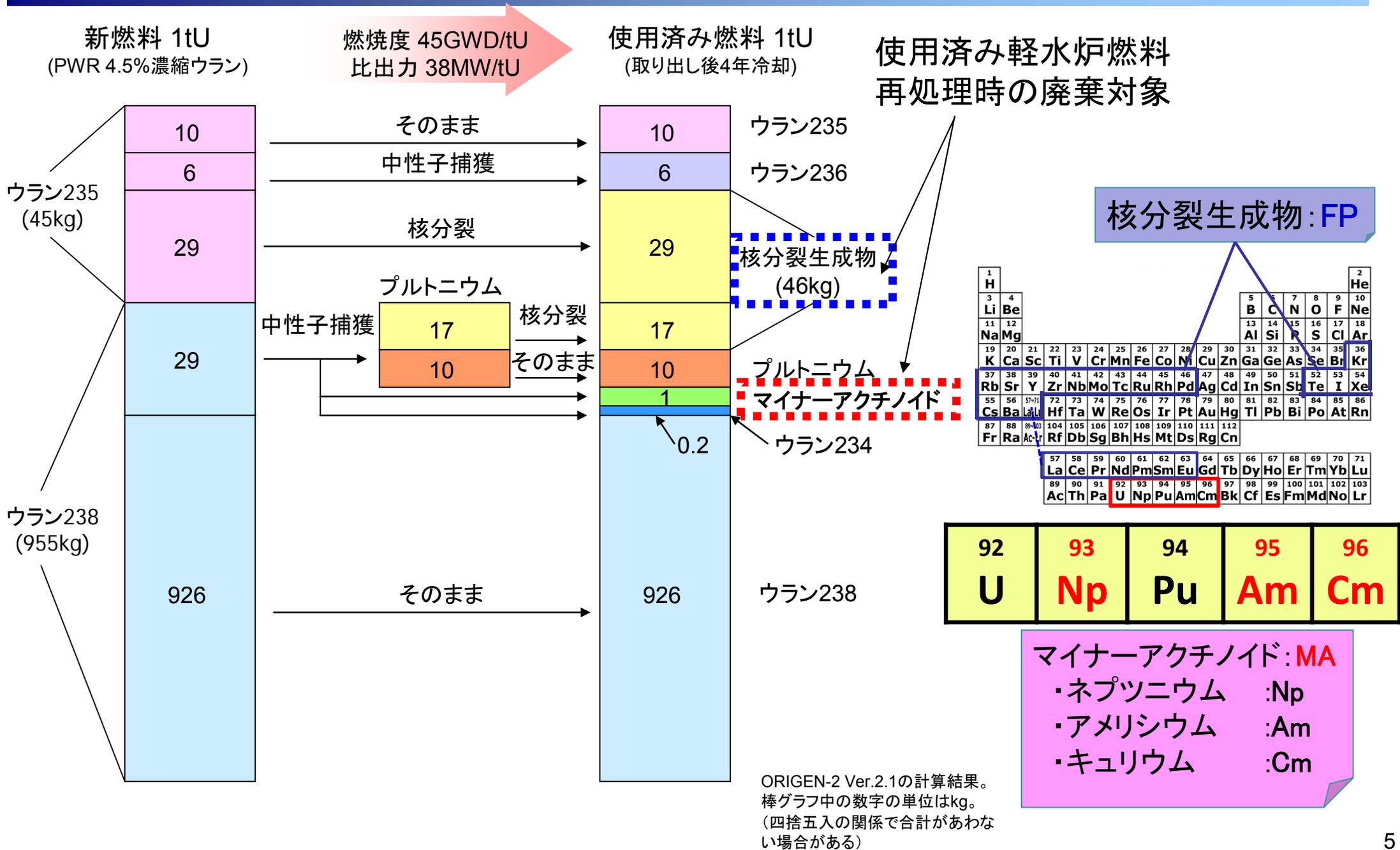
# 我が国の高レベル放射性廃棄物の処分



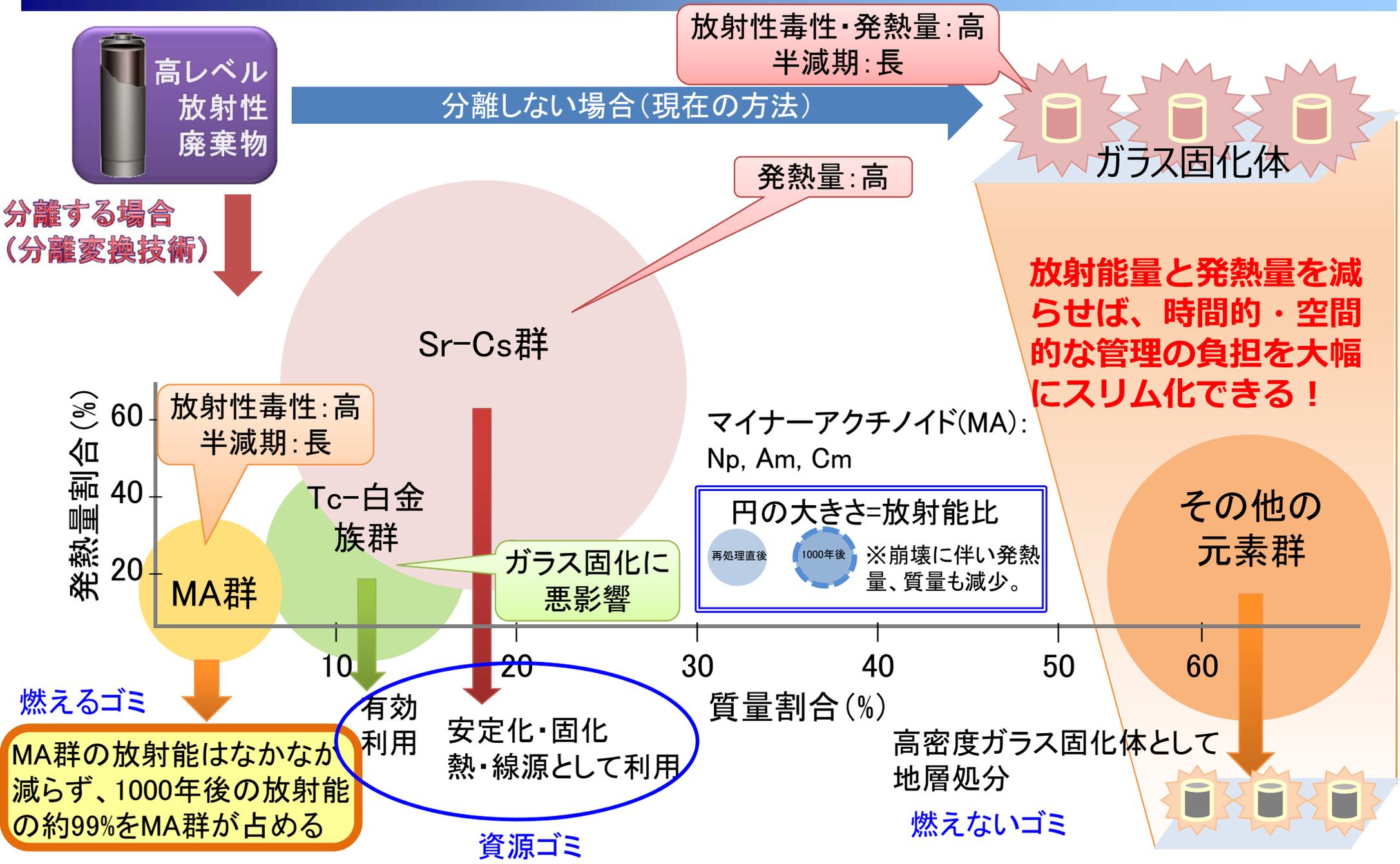
出典：原子力発電環境整備機構「放射性廃棄物の地層処分に向けた取組み」

# 分離変換技術とは：

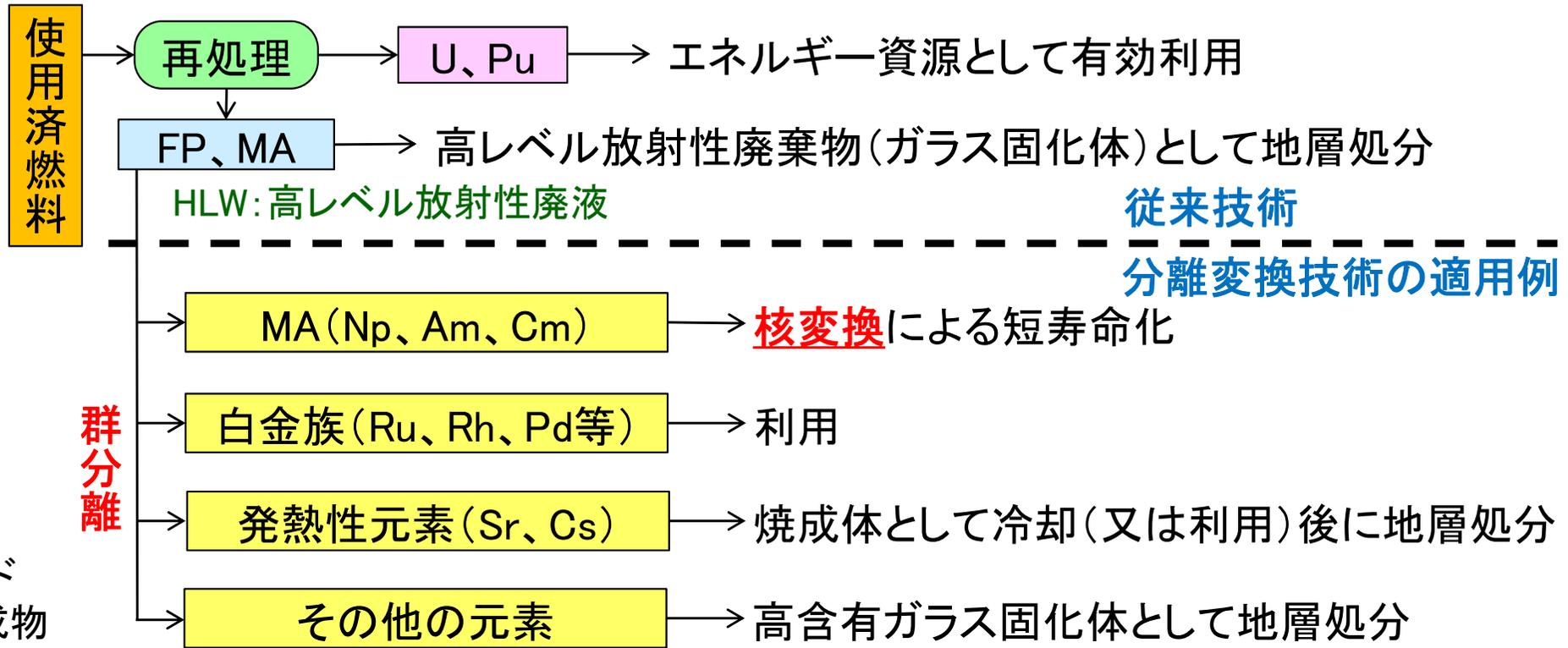
# 原子炉燃料の燃焼による組成の変化 (PWR)



# 放射性廃棄物の分離変換の概要



# Partitioning and Transmutation (P&T)



MA: マイナー  
アクチノイド  
FP: 核分裂生成物

## 分離変換技術

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離する（分離技術）とともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換する（核変換技術）ための技術

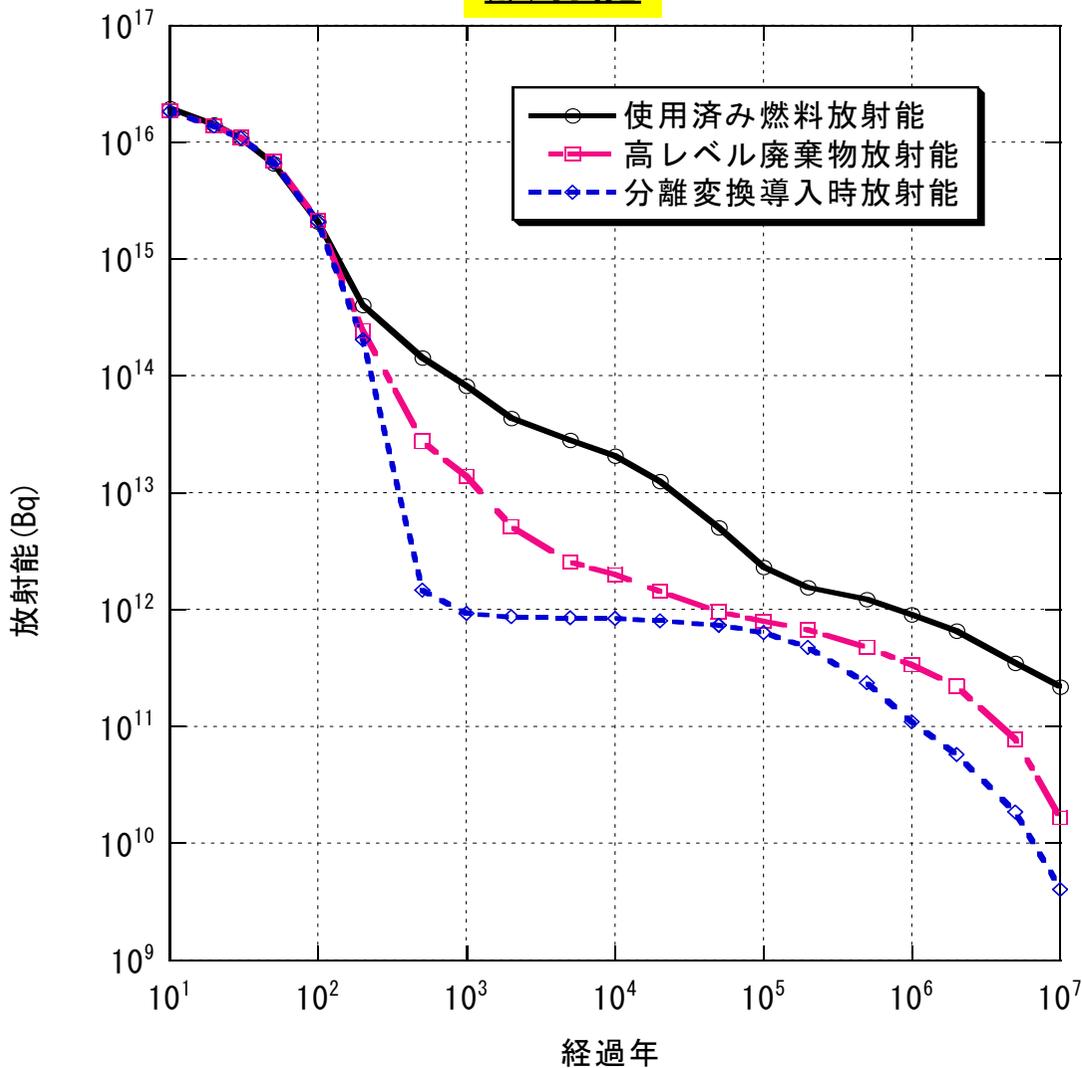
放射性廃棄物の減容化・有害度低減

## 目標

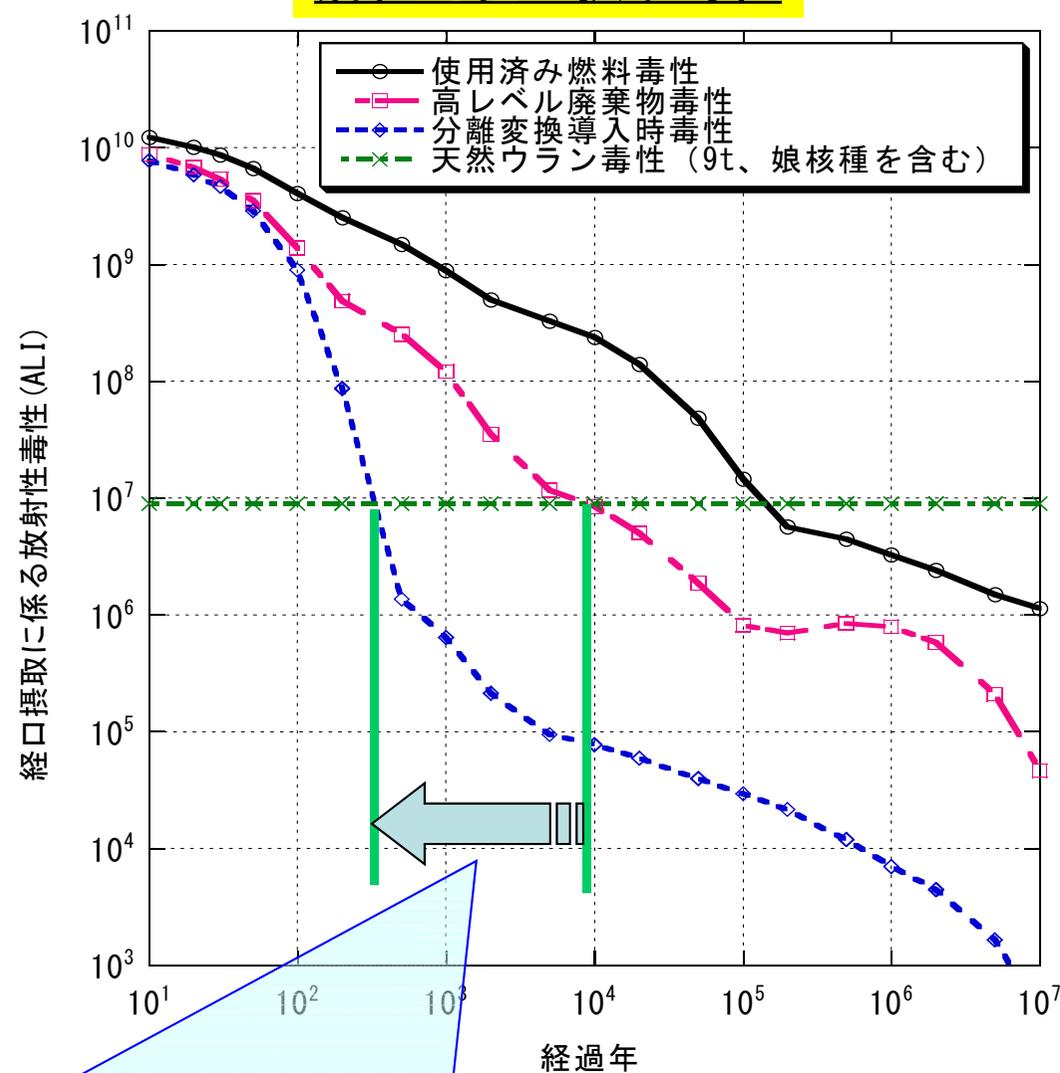
- ・長期リスクの低減：  
廃棄物の潜在的有害度の総量を大幅に低減
- ・処分場の実効処分容量の増大：  
発熱の大きい核種を除去してコンパクトに処分
- ・放射性廃棄物の一部資源化：  
希少元素の利用（白金族など）

# 分離変換導入による潜在的毒性低減効果

放射能



潜在的経口摂取毒性



■ 99.5%のMAを核変換すれば、原料とした天然ウランのレベルまで毒性が減衰するのに要する時間を 1万年 → 数百年 に短縮

分離変換技術とは：

# 分離変換技術の導入による処分概念の合理化



45GWd/tの使用済み燃料32,000tHMで規格化

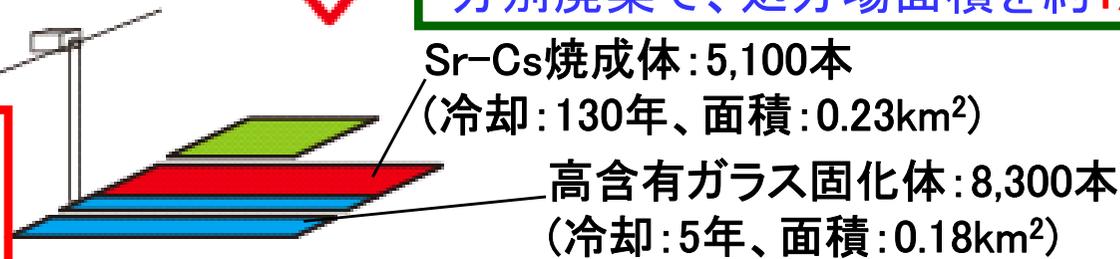
## 従来の地層処分



## 分離変換導入

MAの核変換とSr-Csの100~130年後の  
分別廃棄で、処分場面積を約1/4に

MA核変換は超長期の潜在的有害度削減と長期発熱核種(Am-241)の除去に有効



## さらに長期貯蔵

Sr-Csに300年程度の長期貯蔵を適用することで、全てTRU廃棄物相当の廃棄体とでき、処分場面積を約1/100に

Sr-Cs焼成体: 5,100本  
(冷却320年、面積: 0.005km<sup>2</sup>)



# 分離変換技術の役割として期待されるもの

□ 高レベル放射性廃棄物(HLW)の処理・処分に対して、分離変換技術を導入することで期待されること：

- ✓ 潜在的毒性の低減
- ✓ 将来世代の被ばく線量の低減

超長期間にわたる  
リスクの低減

- ✓ HLWの減容
- ✓ 地層処分場のHLW定置面積の低減

地層処分場の利用期間の  
延長

- ✓ 希少金属(白金族元素等)の回収

- **分離変換 (P&T : Partitioning and Transmutation) 技術**
  - どんな技術で、何を目指しているか？
- **核変換をどのように実現するか**
  - 加速器を使った核変換技術：**加速器駆動システム(ADS : Accelerator-Driven System)**
  - ADSを中心とした**階層型燃料サイクル**
- **分離変換技術の実現に向けた研究開発**
  - ADS関連研究開発
  - 将来計画(核変換実験施設)
- **まとめ**

MAの核変換をどのように実現するか：

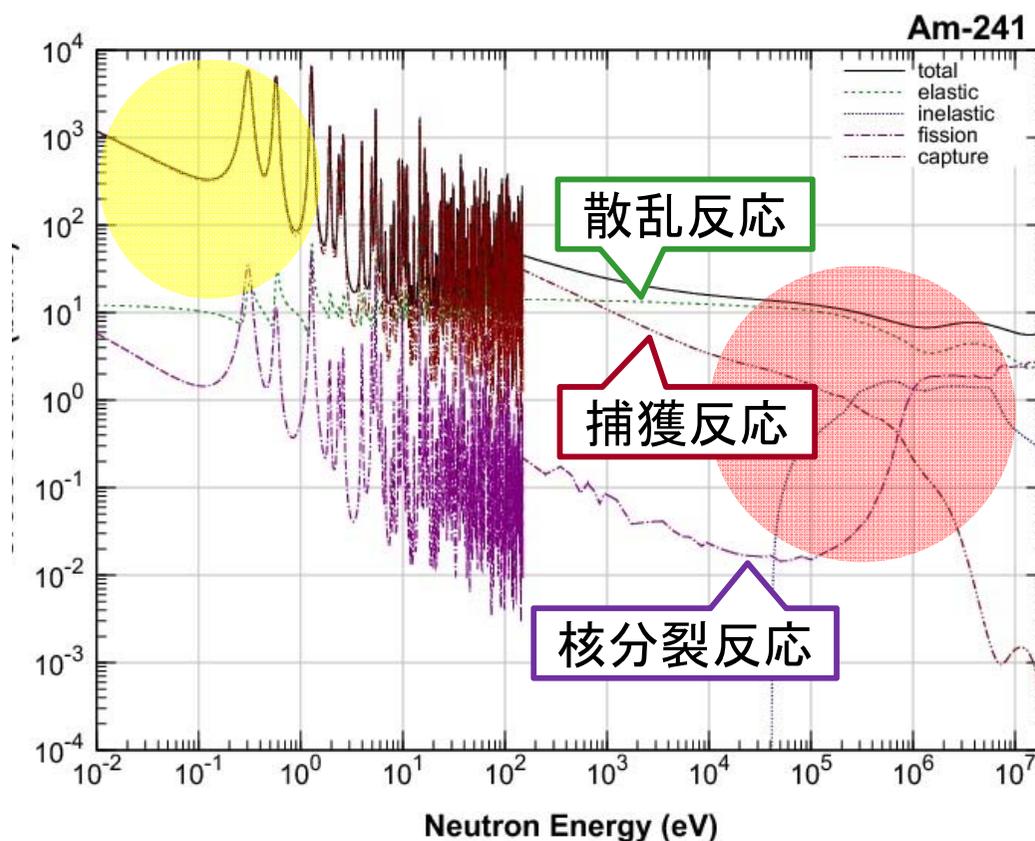
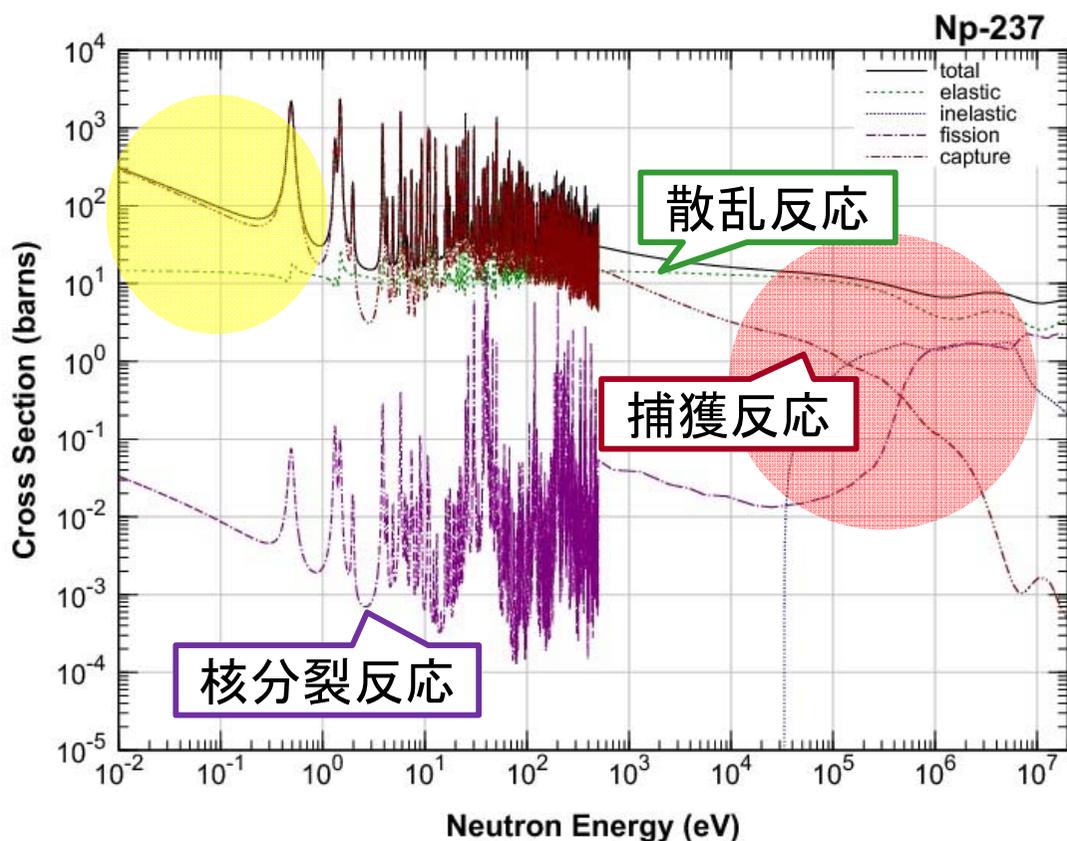
# MAの反応断面積

代表的なMAである、Np-237とAm-241の核反応断面積

軽水炉のエネルギー領域では、ほとんど核分裂しない

高速炉のエネルギー領域では、核分裂しやすくなる。

◆MAの核変換には、高速中性子による核分裂の連鎖反応の利用が有利。



● 軽水炉のエネルギー領域

● 高速炉のエネルギー領域

MAの核変換をどのように実現するか：

# MAを入れることによる炉心特性の変化



## 核反応断面積の特徴

- ◆ 中性子エネルギー数百keV以下：
  - 中性子捕獲断面積： U-238の数倍
- ◆ 中性子エネルギー1MeV以上：
  - 核分裂断面積： Pu-239と同程度



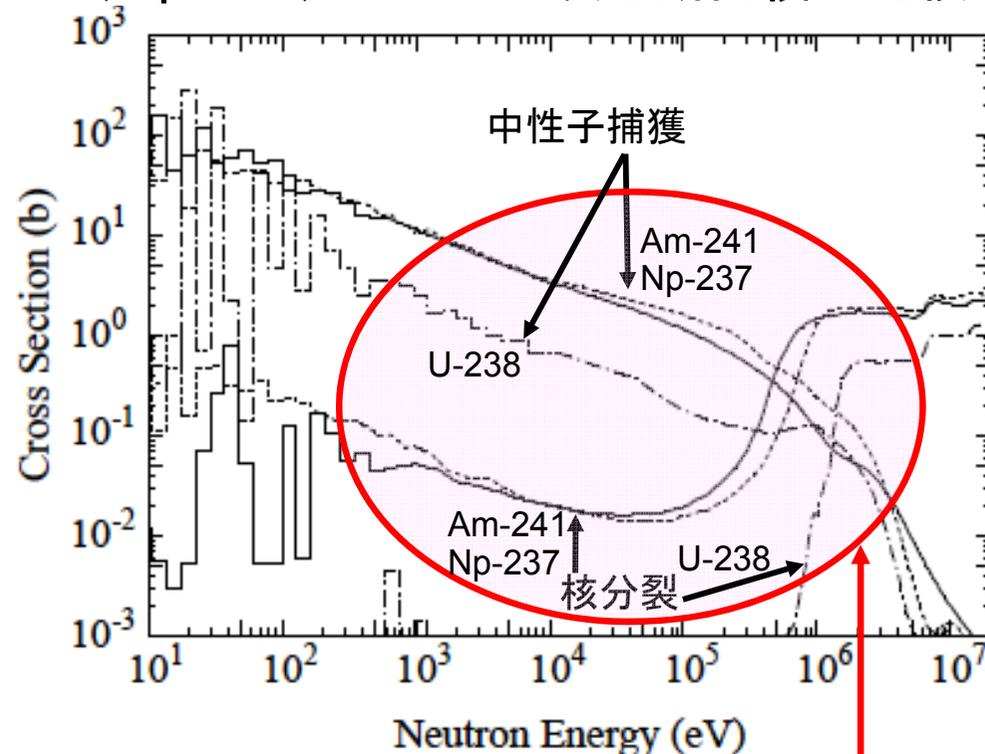
- 高いエネルギーの中性子が核分裂しやすく
- 低いエネルギーの中性子が吸収されやすく



## 炉特性への影響

- ✓ 冷却材ボイド効果(正の効果)が大きく
- ✓ ドップラー効果(負の効果)が小さく

## U-238、Np-237、Am-241の反応断面積の比較



FBRやADSにおける主な  
中性子のエネルギー範囲

## ● MAの遅発中性子割合は小さい

核種	U-238	Np-237	Pu-239	Am-241	Am-243	Cm-244
遅発中性子割合	1.8%	0.44%	0.21%	0.15%	0.25%	0.13%



## 炉特性への影響

- ✓ 遅発中性子割合が小さく

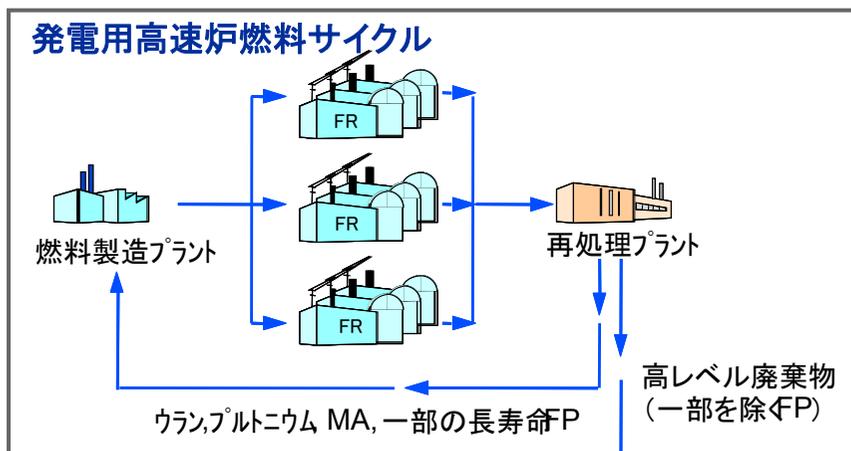
MAの核変換をどのように実現するか：

## 核変換システムを実現するには？



- MAを効率良く核変換するためには、MAをたくさん集めて高速中性子によるMAの核分裂反応を用いるのが望ましい。
- 上記の観点から言えば、MAを大量に装荷した高速炉(FR)がMA核変換システムとして最も望ましい。しかし、そのような臨界状態の高速炉を安全に運転するのは容易ではない。なぜなら、
  - ✓ 遅発中性子の割合が小さい
  - ✓ 冷却材ボイド時の正の反応度効果大きい
  - ✓ ドップラー効果による負の反応度効果が小さい
- 従って、上記の問題点を避けるために、二つの方法が提案されている
  - MAの割合を少なくする → FRへのMA均質装荷 (5%以下)
  - 体系を未臨界にする → 加速器駆動炉 (ADS)

# MAの核変換をどのように実現するか： 2つの核変換システム概念

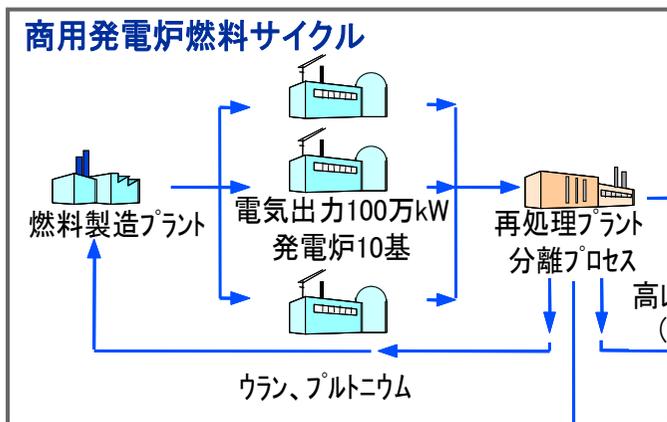


FP : 核分裂生成物  
MA : マイナーアクチノイド



## 高速炉サイクル利用型

- ・発電炉を用いた分離変換技術。
- ・次世代再処理プラントでウランやプルトニウムと共にマイナーアクチノイドもリサイクル。
- ・核変換には発電炉(高速炉)を用いる。

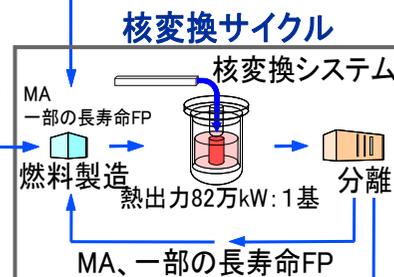


FP : 核分裂生成物  
MA : マイナーアクチノイド



## 専用サイクル型(階層型)

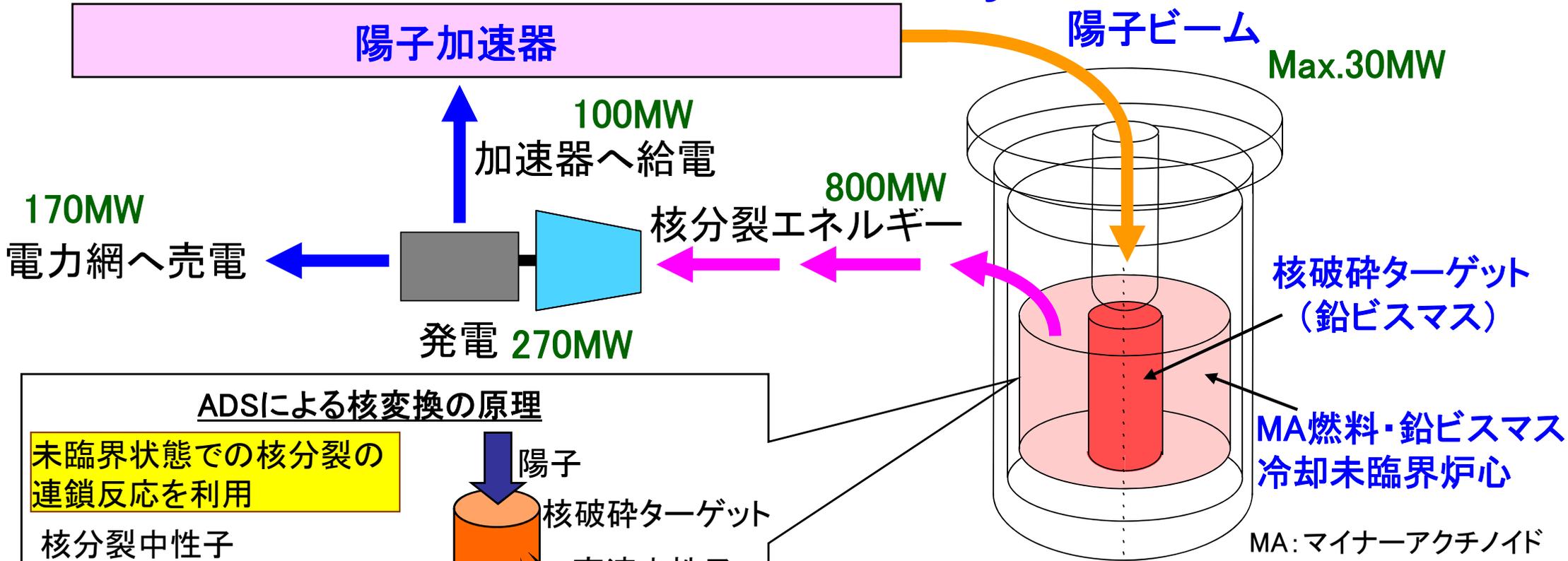
- ・発電用サイクルに分離プロセスと核変換サイクルを付設。
- ・核変換には専用システム(加速器駆動炉: ADS)を用いる。
- ・コンパクトな核変換サイクルにマイナーアクチノイドを閉じ込める。



一部を除くFP

# MAの核変換をどのように実現するか： 加速器駆動システム (ADS)

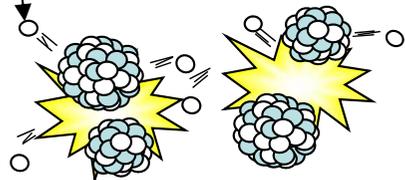
## ADS : Accelerator-Driven System



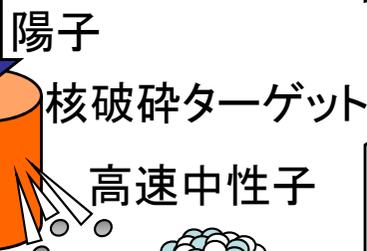
### ADSによる核変換の原理

未臨界状態での核分裂の連鎖反応を利用

核分裂中性子



短寿命の核種



MA核種

陽子と重い元素 (鉛ビスマス) の核破砕反応で大量の高速中性子を生成。

### ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止  
→ 核反応の暴走の心配が無い。
- ・MA濃度の高い燃料が使用可能  
→ 1基で軽水炉10基分のMAを核変換。

MAの核変換をどのように実現するか：

# JAEAで検討しているADSの概略仕様



- 陽子ビーム：1.5GeV
- 核破砕ターゲット：鉛ビスマス
- 炉心冷却材：鉛ビスマス
- 最大  $k_{\text{eff}} = 0.97$
- 熱出力：800MWt
- 燃料組成：

(MA + Pu)窒化物 + ZrN

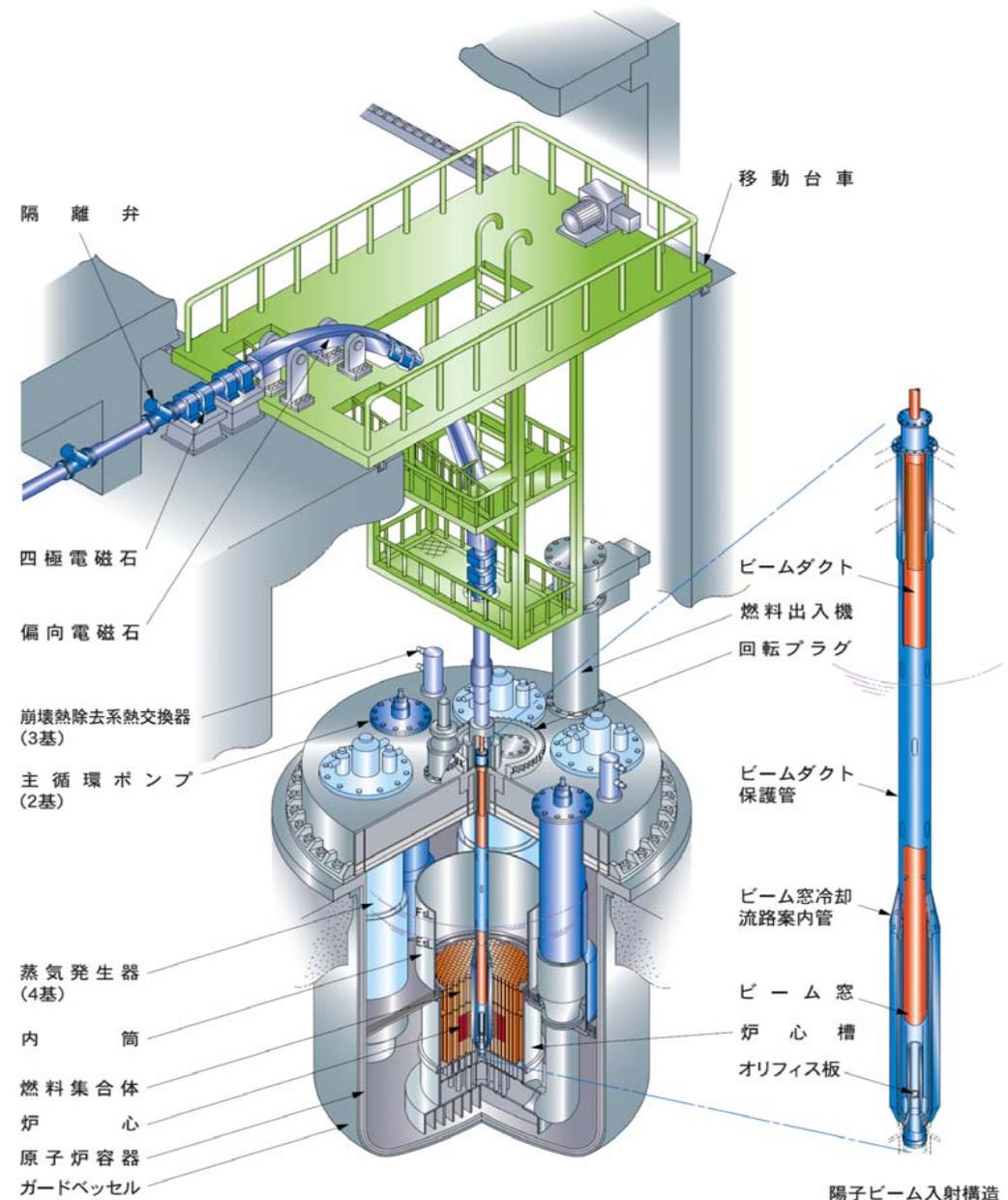
初期組成:

領域-1: Pu/HM=30.0%

領域-2: Pu/HM=48.5%

- 核変換量：  
250kgMA / 年 (典型的な軽水炉  
10基分の年間生成量に相当)
- 燃料交換; 600EFPD, 1 バッチ

鉛ビスマスは比較的低融点(約130°C)で化学的に不活性。



- **分離変換 (P&T : Partitioning and Transmutation) 技術**
  - どんな技術で、何を目指しているか？
- **核変換をどのように実現するか**
  - 加速器を使った核変換技術：**加速器駆動システム(ADS : Accelerator-Driven System)**
  - ADSを中心とした**階層型燃料サイクル**
- **分離変換技術の実現に向けた研究開発**
  - ADS関連研究開発
  - 将来計画(核変換実験施設)
- **まとめ**

# 加速器駆動システム(ADS)の研究開発

## 「加速器駆動システム(ADS)」の研究開発を実施中

### ADS開発上の主な課題

- 必要な陽子の数を稼ぐのが難しく(現状では陽子ビーム**強度**が足りない)、多くの**エネルギー**が必要
- **液体鉛ビスマス**を安全に取り扱うための技術の開発
- 加速器と結合した実証試験



### 課題解決に向けた主な研究開発項目

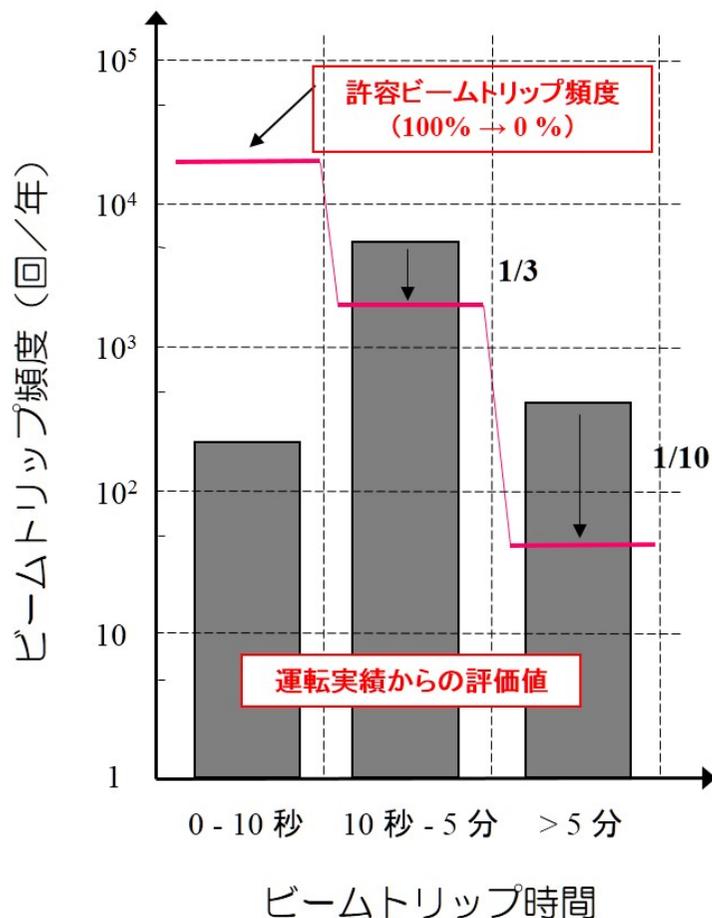
- **大強度で、信頼性・エネルギー効率の高い加速器**の開発
- 大強度の陽子ビームを受け止めて、安全に運転可能な**液体鉛ビスマス取扱技術**の開発
- 加速器と未臨界炉心を結合したシステム実証試験

# ビームトリップ事象のADSへの影響評価

- ビームトリップ時の主要機器に対する熱負荷から許容ビームトリップ頻度を評価し、J-PARCリニアックの運転データに基づいて推定したADS用加速器のビーム停止頻度と比較。
- 10秒以上のビームトリップについては、**現状の1/3~1/10**までビームトリップ頻度を低減する必要がある。

## ADS用加速器の開発方針

1. トリップ時間の短縮
2. トリップ頻度の低減
3. ビームトリップ許容値の向上



ビームトリップ時間	許容ビームトリップ頻度	備考
0 秒 < T < 10 秒	$2 \times 10^4$ $> 5 \times 10^5$ $2 \times 10^4$ <b>20,000 回/年</b>	ビーム窓からの制限 燃料被覆管からの制限 内筒からの制限
10 秒 < T < 5 分	$2 \times 10^4$ $> 5 \times 10^5$ $2 \times 10^3$ $> 2.5 \times 10^4$ <b>2,000 回/年</b>	ビーム窓からの制限 燃料被覆管からの制限 内筒からの制限 原子炉容器からの制限
T > 5 分	<b>42 回/年</b>	プラント稼働率からの制限 (> 70%)

分離変換技術の実現に向けた研究開発：

# ADS用の大強度陽子加速器の開発



## 信頼性の高い加速器開発

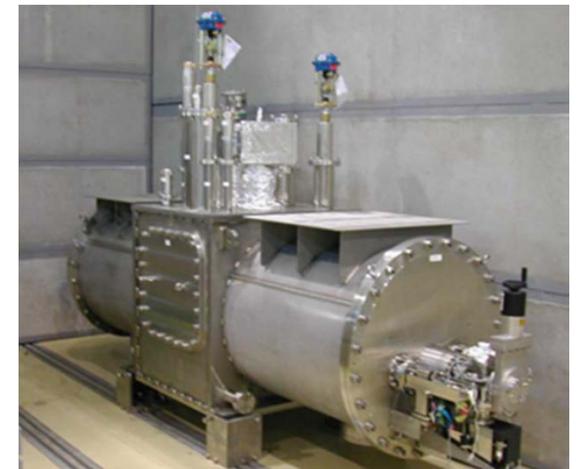
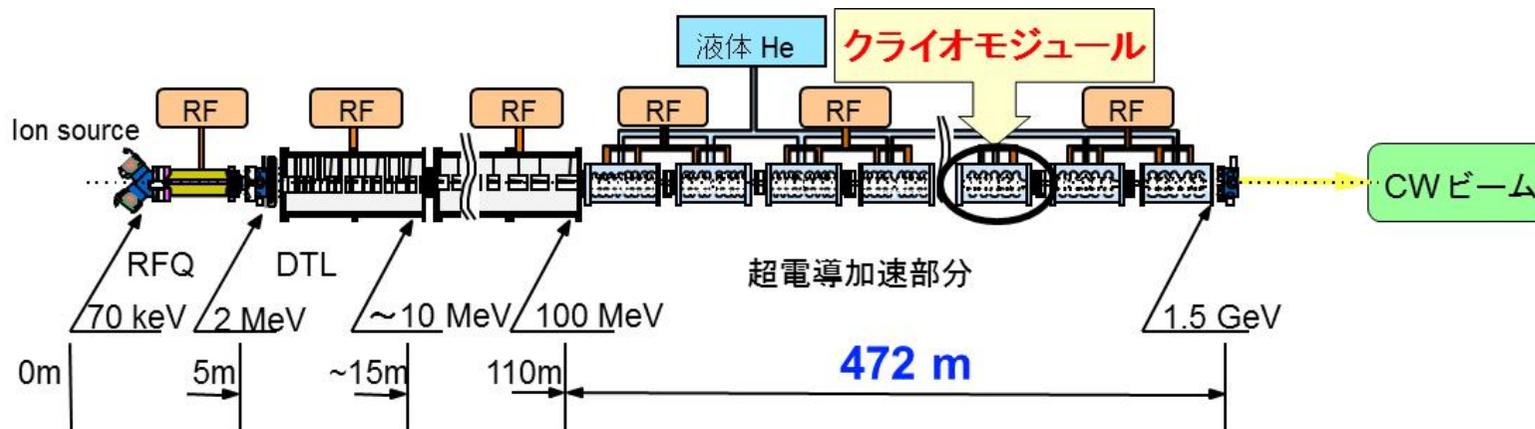
J-PARCの陽子リニアック (400MeV, 25Hz)の  
運転経験の蓄積。



J-PARCの400MeVリニアック

## エネルギー効率の高い加速器開発

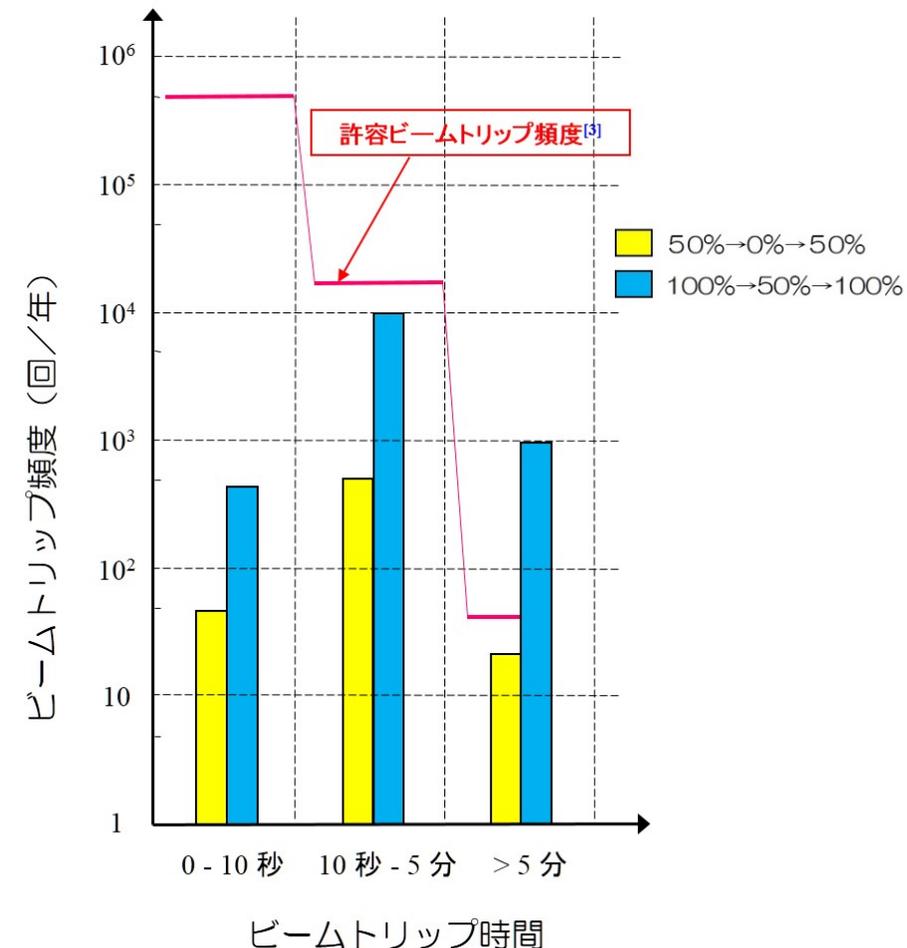
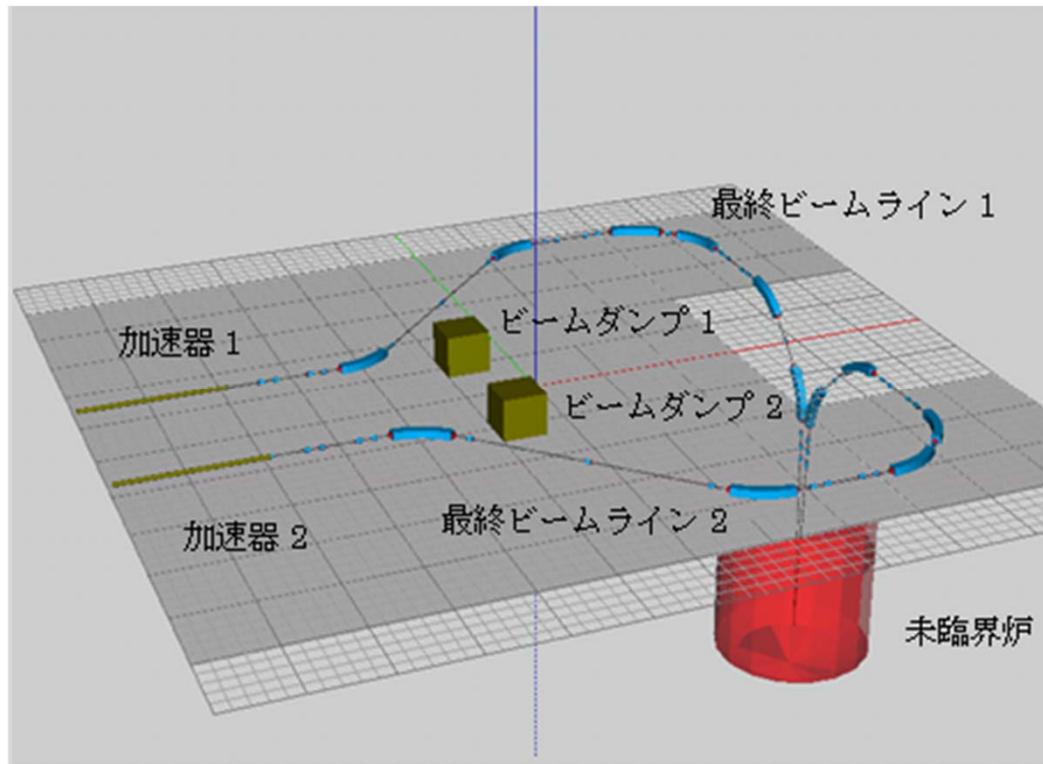
超伝導加速器用の機器(クライオモジュール)  
を試作。試作した機器の試験結果を基にADS  
用の超電導リニアックの概念設計を実施。



試作クライオモジュール

# 加速器を並列化したADS概念検討

- 現状の技術水準から評価し、50%出力の加速器2台による完全並列化概念を検討。
- 並列化ラインのビーム窓導入までの電磁石配置を設定するとともに、ビームトリップ頻度および許容ビームトリップ頻度（主要機器構造健全性検討）の評価を実施。



ビームライン並列化概念と並列化によるビームトリップ頻度推定評価値



## 主な試験装置

**OLLOCHI**: 液体鉛ビスマスループ中での材料挙動試験

**IMMORTAL**: ADSターゲット試験施設(TEF-T)用の総合機能試験装置

# LBE液体鉛ビスマス(LBE)取扱い技術の開発



## □ 酸素センサー校正装置

- 液体鉛ビスマス中での鋼材腐食の防止に必須の酸素濃度制御用の酸素センサーの開発。



## □ 材料腐食試験ループ: OLLOCHI (Oxygen-controlled Lbe LOp for Corrosion tests in High temperature)

- 酸素濃度制御下での液体鉛ビスマス中における鋼材腐食試験用鉛ビスマスループ。



## □ TEF-Tモックアップ試験ループ: IMMORTAL (Integrated Multi-functional MOckup for TEF-T Real-scale TArget LOp)

- ADSターゲット試験施設(TEF-T)用の総合機能試験用の鉛ビスマスループ。

# ビーム窓候補材陽子照射試験：MEGAPIE



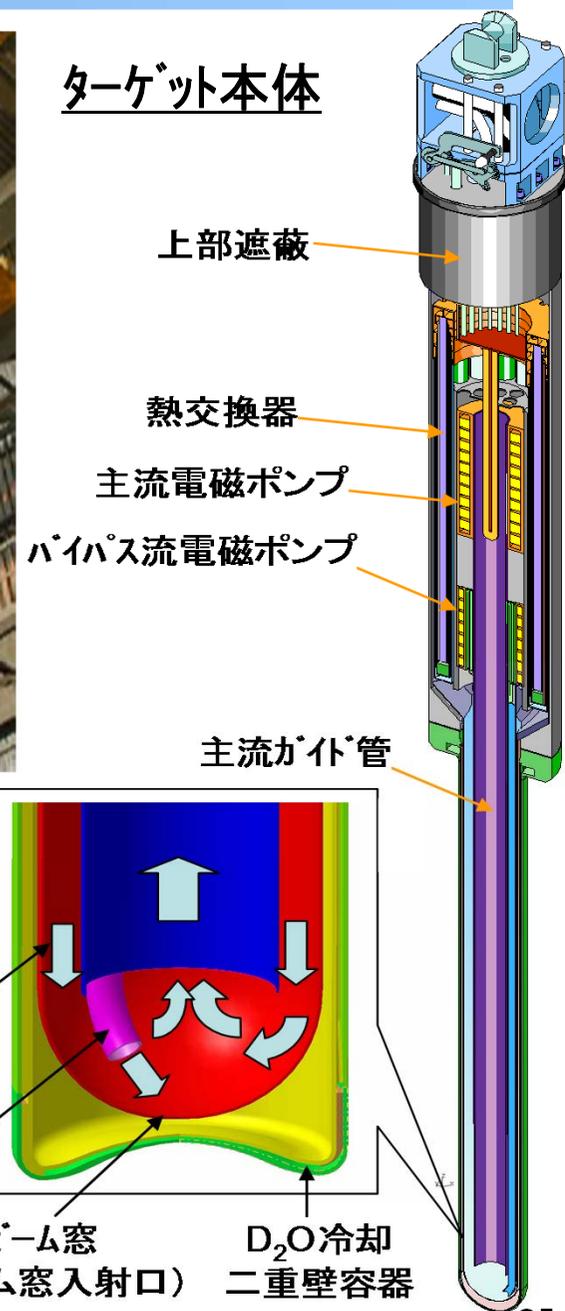
## MEGAPIE国際共同実験

### 実験の概要とこれまでの成果：

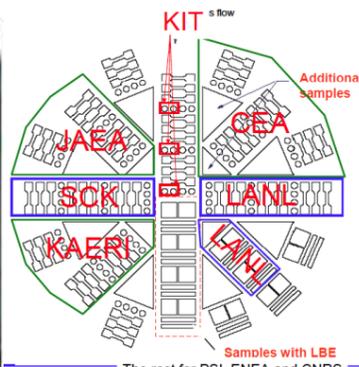
- スイス・ポールシェラー研究所 (PSI) の加速器中性子源施設 SINQ を利用し、世界初のメガワット級液体鉛ビスマス核破砕ターゲットの成立性を実証
- スイス、フランス、ドイツ、ベルギー、イタリア、日、米、韓が参加
- 2006年8月17日に700kW (1.2mA × 580MeV) の入射に成功
- その後、供用を開始し、最高1.35mAで、12月21日まで運転
- 照射後の材料試験を実施中



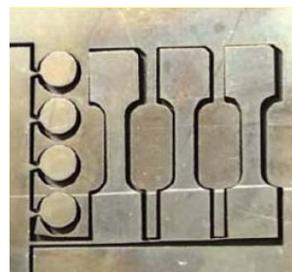
ターゲット本体



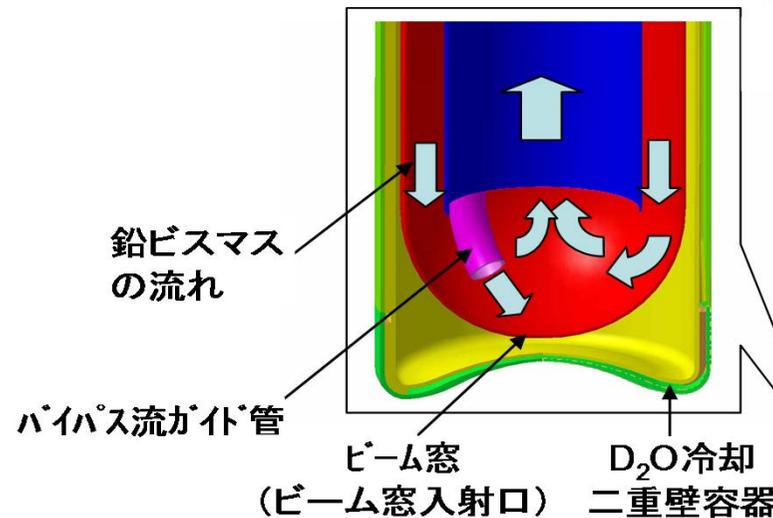
照射試験後のビーム窓部



ビーム窓部の試験片切り出しと分配案



放電加工による試験片切り出し (モックアップ試験)



分離変換技術の実現に向けた研究開発：

# 未臨界体系の原子炉物理実験



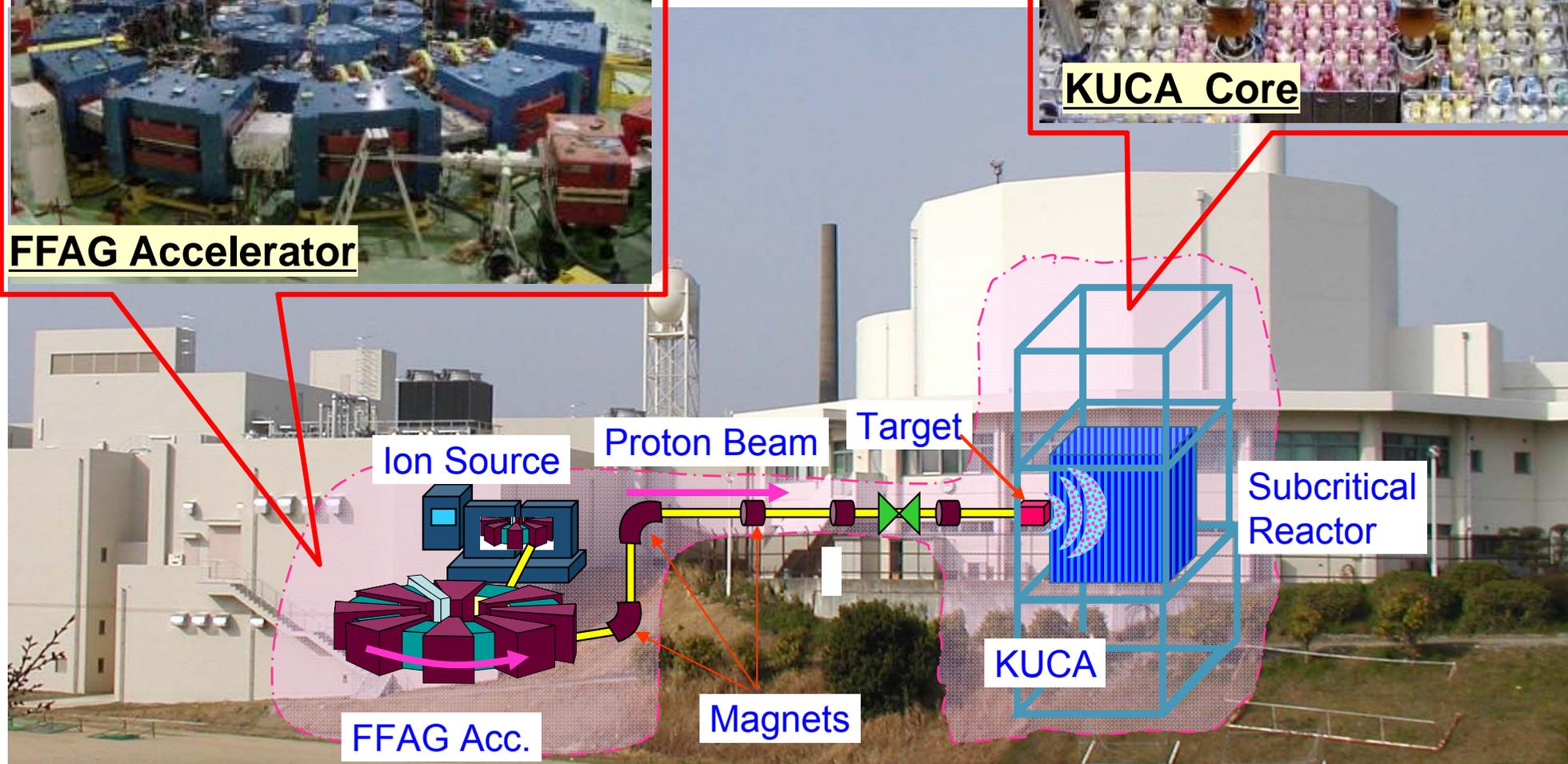
- 京都大学原子炉実験所の臨界集合体KUCA (Kyoto University Critical assembly)を用いた炉物理実験を実施。



FFAG Accelerator



KUCA Core



Ion Source

Proton Beam

Target

Subcritical Reactor

KUCA

FFAG Acc.

Magnets

分離変換技術の実現に向けた研究開発(将来計画) :

# 大強度陽子加速器プロジェクト J-PARC



分離変換技術の実現に向けた研究開発(将来計画) :

# J-PARCにおける核変換実験施設(検討中)



## ADSターゲット試験施設 (TEF-T)

LBE核破碎ターゲットの工学的課題解決  
ADS構造材の照射データベースの構築  
二次粒子の多目的利用

- 陽子ビーム強度: 400MeV-250kW
- LBE運転温度:  $500^{\circ}\text{C}_{\text{max}}$
- LBE中酸素濃度を制御し、腐食抑制
- PIE試料作製のためのセルを設置

## 核変換物理実験施設 (TEF-P)

ADS・MA装荷炉の核特性の解明

- 陽子ビーム強度: 400MeV-10W
- 水平2分割型臨界集合体を設置
- MA含有燃料を用いた炉物理実験を実施



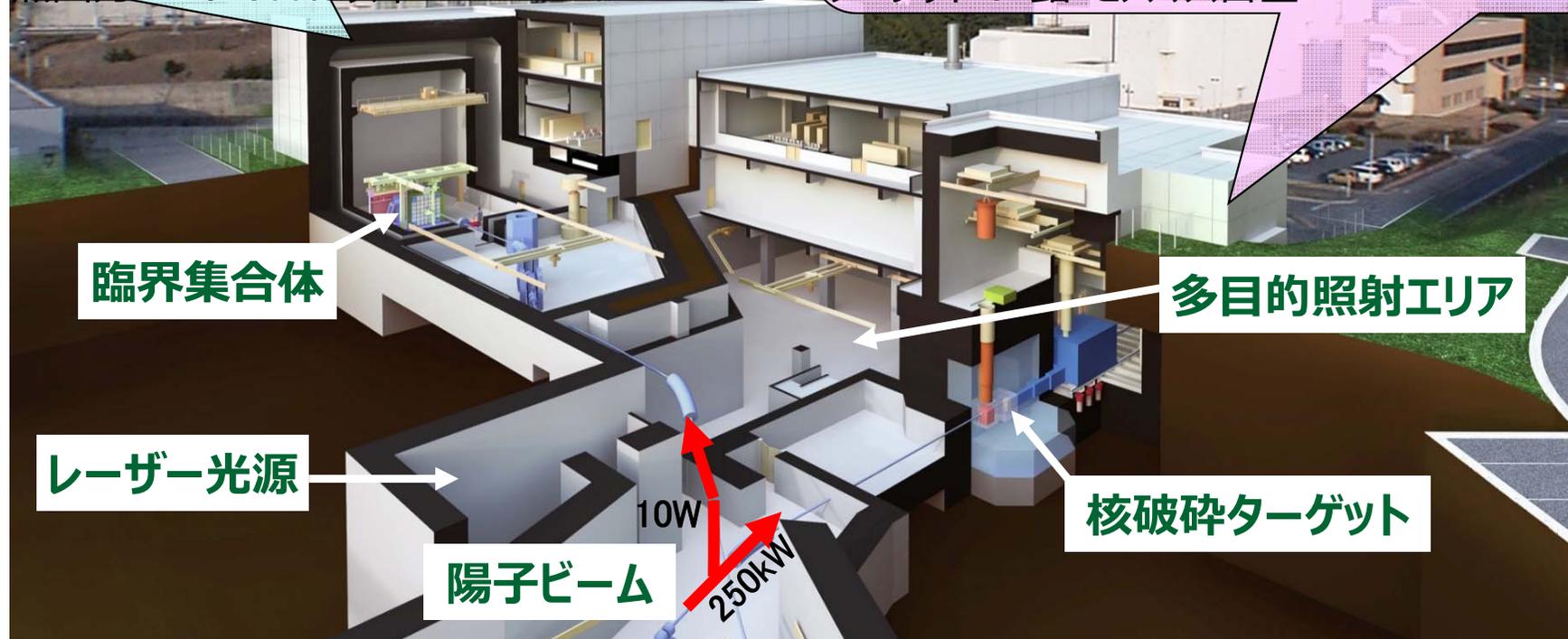
# J-PARCにおける核変換実験施設(検討中)

## 核変換物理実験施設:TEF-P

目的： 低出力で未臨界炉心の物理的特性の探索とADSの運転制御経験を蓄積  
施設区分： 原子炉(臨界実験施設)  
陽子ビーム： 400MeV-10W  
熱出力： 500W以下

## ADSターゲット試験施設:TEF-T

目的： 大強度陽子ビームでの核破碎ターゲットの技術開発及び材料の研究開発  
施設区分： 放射線発生装置  
陽子ビーム： 400MeV-250kW  
ターゲット： 鉛・ビスマス合金

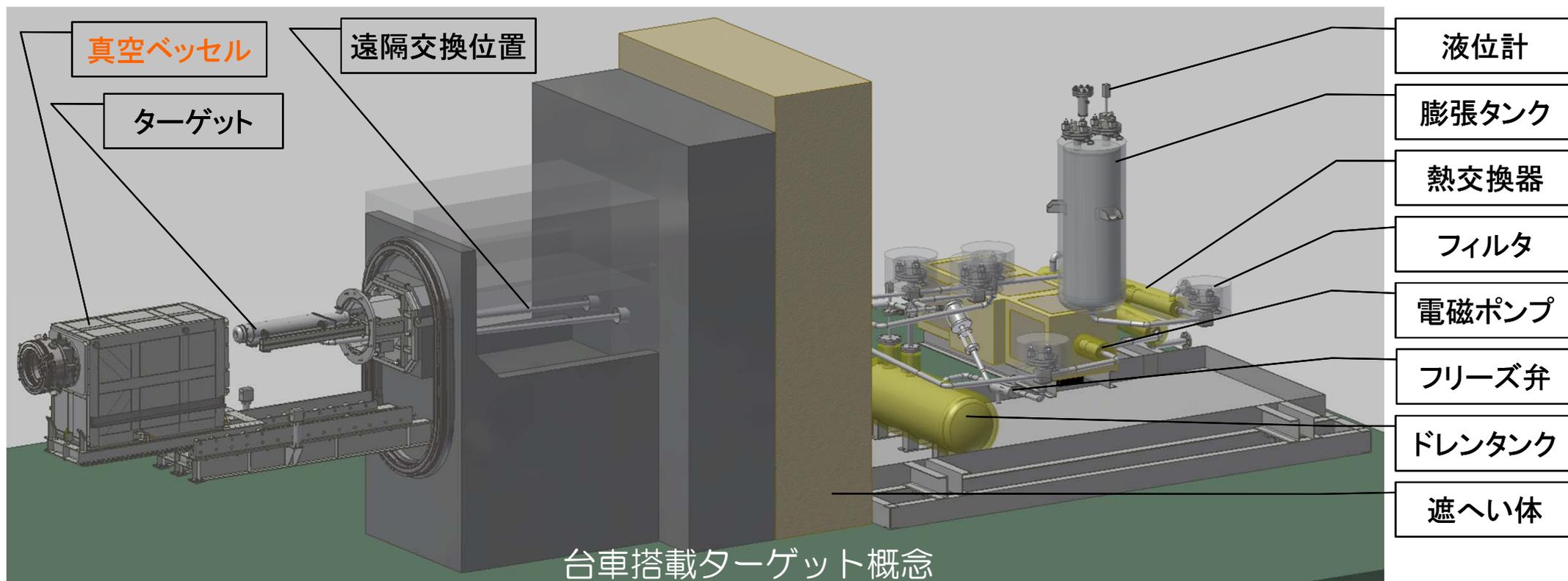


分離変換技術の実現に向けた研究開発(将来計画) :

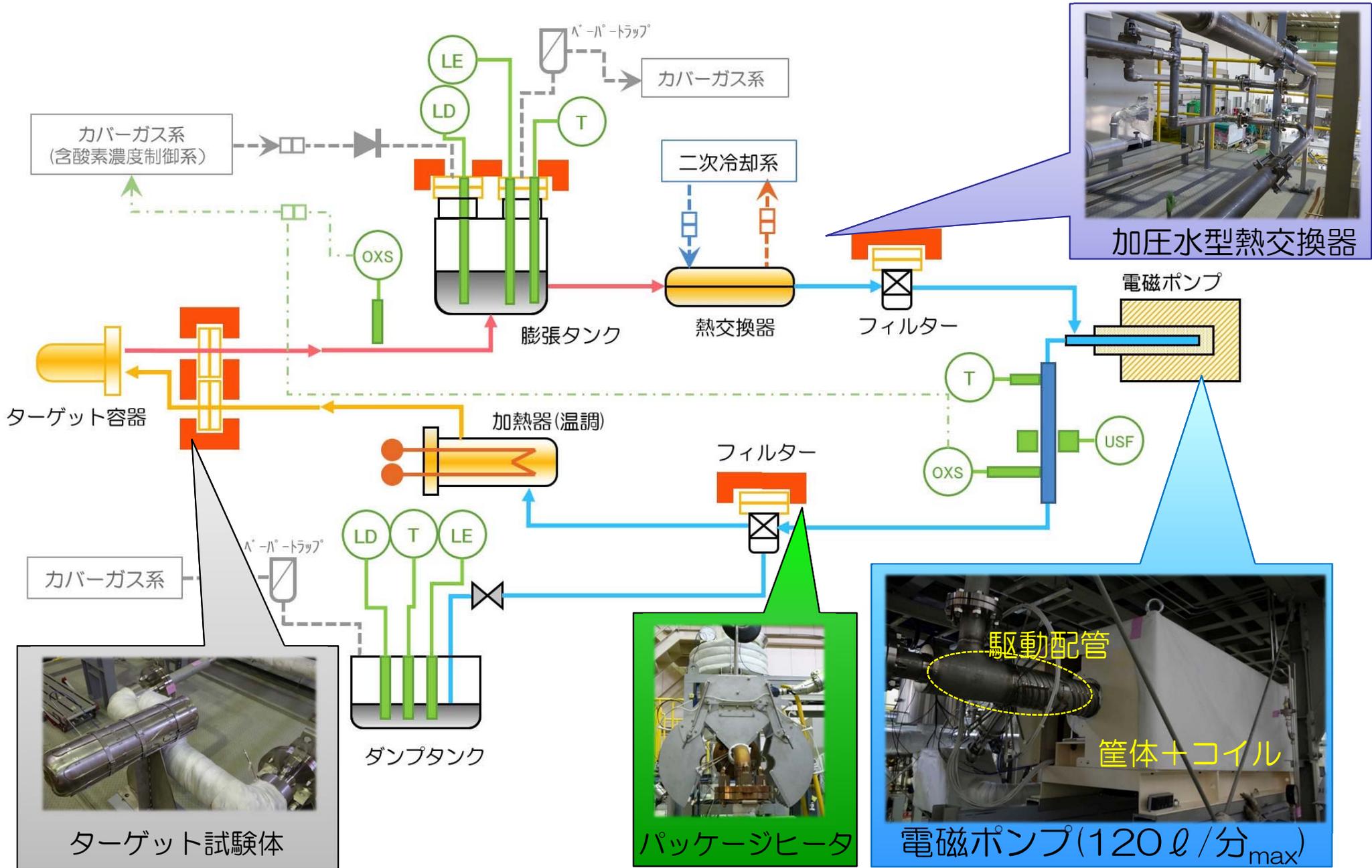
# ADSターゲット試験施設 (TEF-T)(検討中)



- 陽子ビームと高速中性子による材料(ADSのビーム窓候補材等)照射施設
- 鉛ビスマス核破碎ターゲットの条件(温度、流速等)を変え、ADS実用化の際に必要なデータベースを構築



# TEF-T用モックアップ試験ループ: IMMORTAL

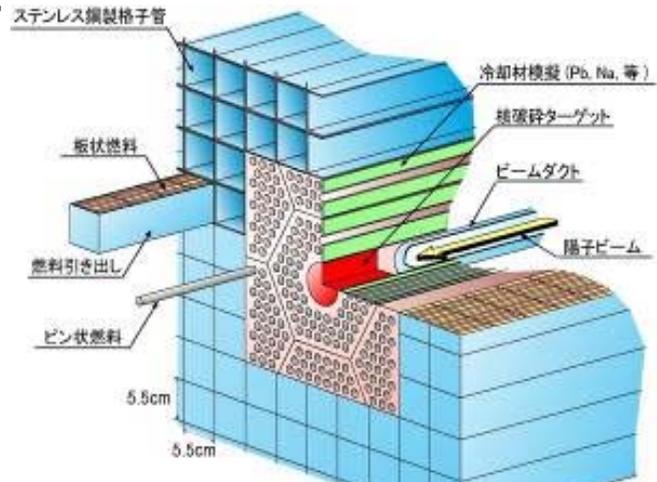


分離変換技術の実現に向けた研究開発(将来計画) :

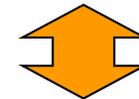
# 核変換物理実験施設 (TEF-P)(検討中)



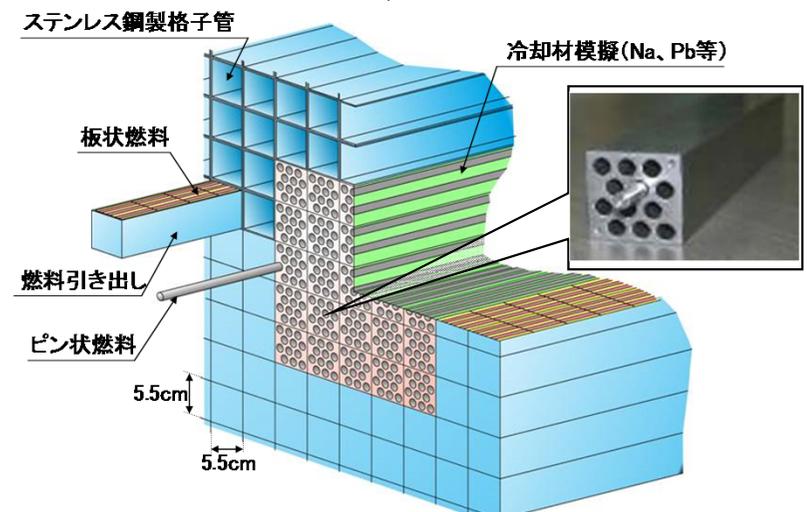
- 既存の高速炉臨界実験装置(FCA)に準拠した設計
- 核変換に係わる炉物理・核データの研究を実施 (ADSとFBRの双方に貢献)
- 中心5×5格子管を交換可能とし、**ピン燃料装荷実験**や**高発熱試料(MAやFP)**を用いた実験に供することのできるようにする。(但し、遮蔽、冷却、遠隔操作が必要)



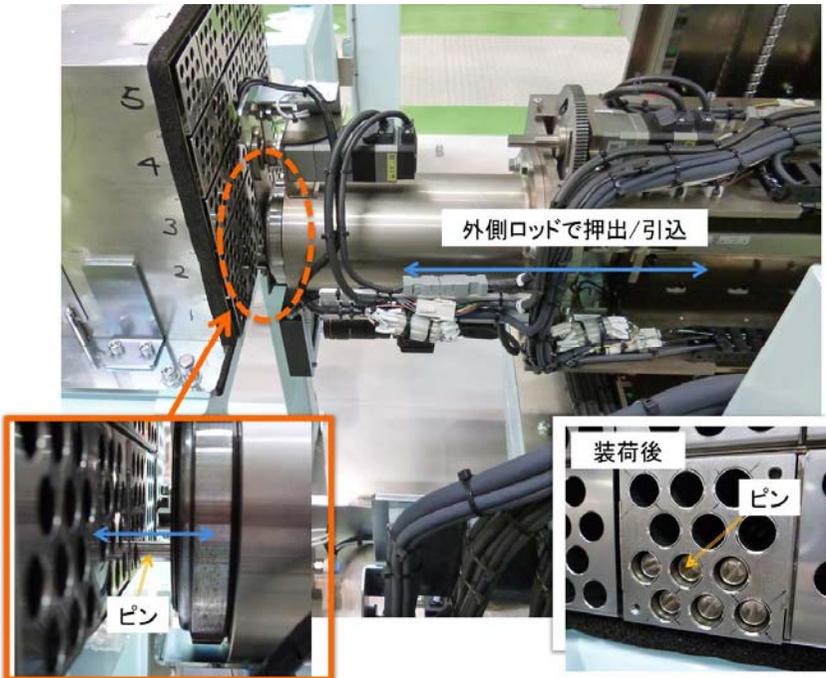
「陽子導入未臨界運転」でのADS模擬実験



柔軟に対応可能



「臨界運転」でのMA装荷体系模擬実験

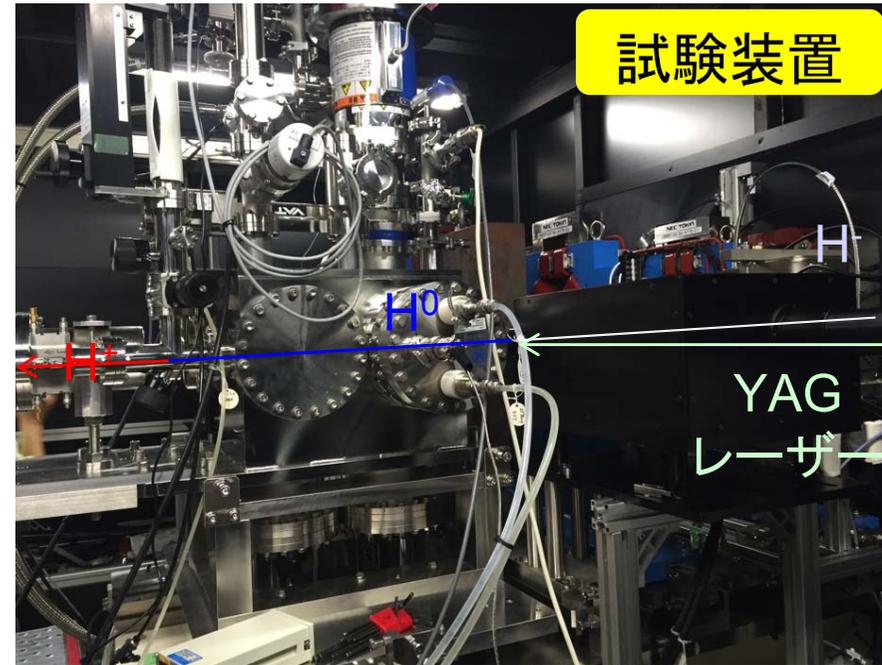


MA燃料ピン用の燃料装填試験装置

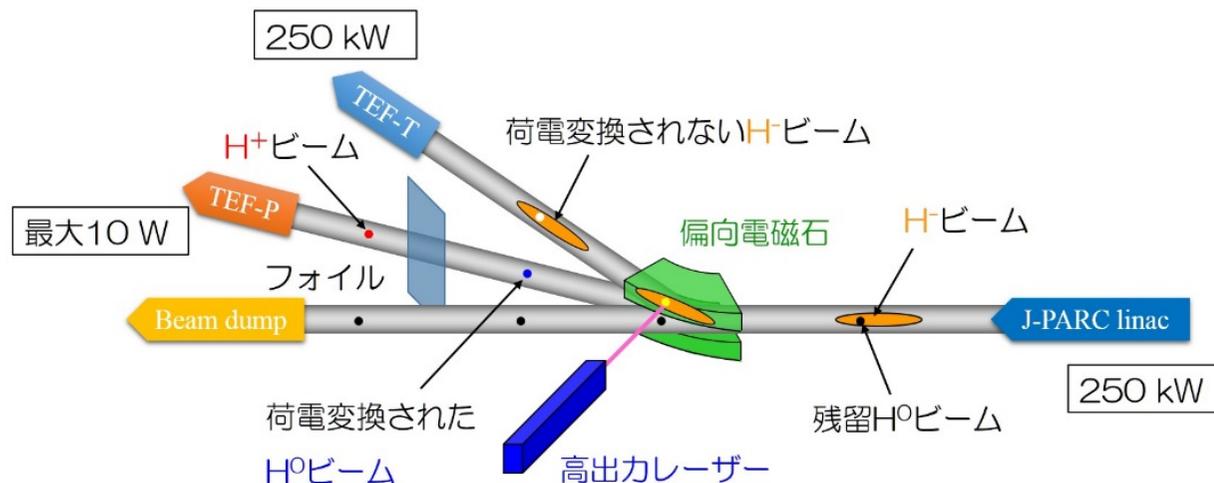
分離変換技術の実現に向けた研究開発(将来計画) :

# TEF-P用要素技術開発: 微小陽子ビーム取出技術

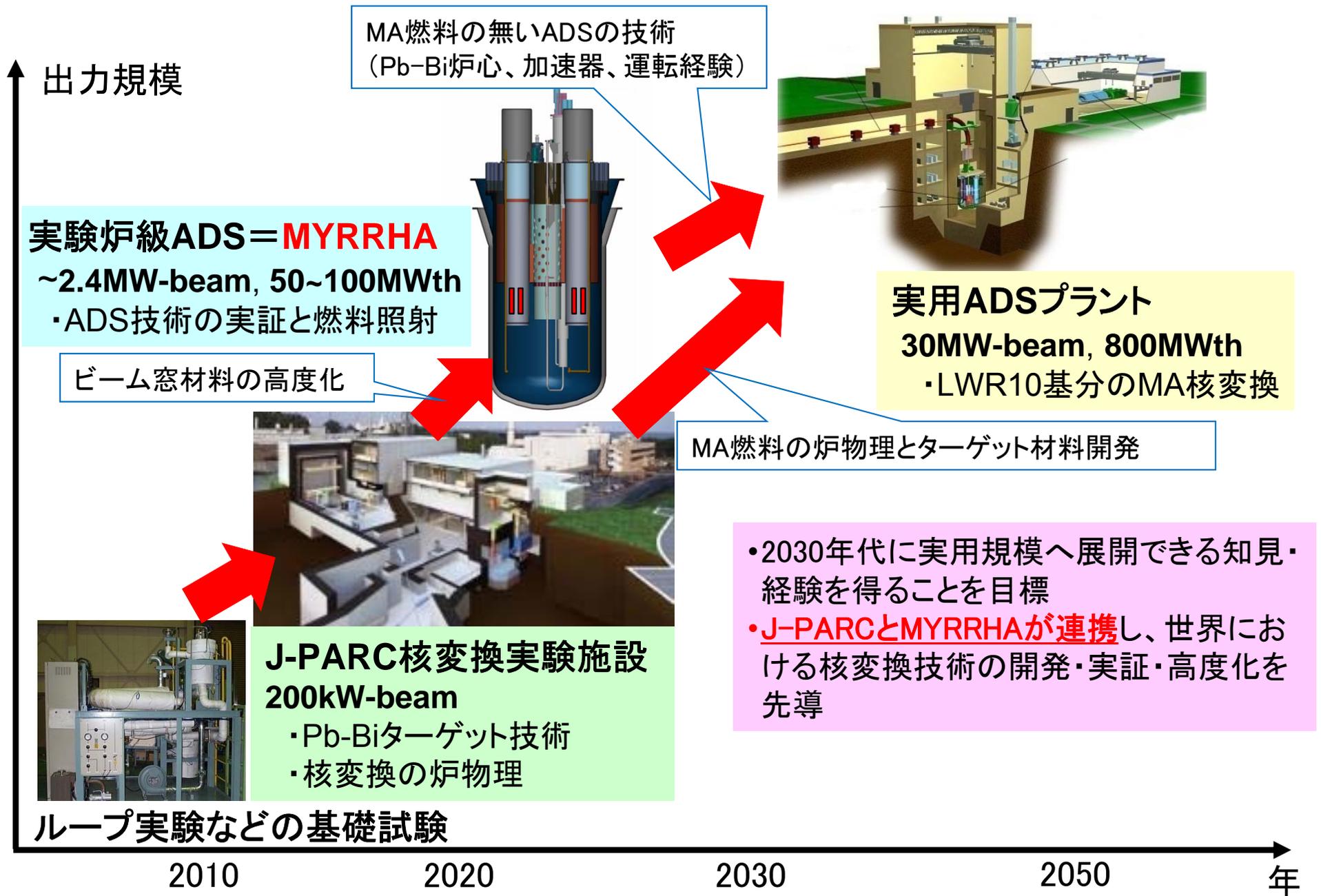
- ✓ TEF-Pに未臨界炉駆動用微小ビームを供給
- ✓ 陽子ビームを利用した実証試験を実施
  - LINACのクライストロン準備室において、RFQから出射されるH<sup>-</sup>ビーム(3MeV)を用いた荷電変換試験を実施。
  - 取出されたH<sup>+</sup>ビームの強度は、TEF-Tのビーム条件(ピーク電流50mA、25Hz)に換算して約8Wとなり、概ねTEF-Pの要求出力(最大10W)を満足した。



## 原理

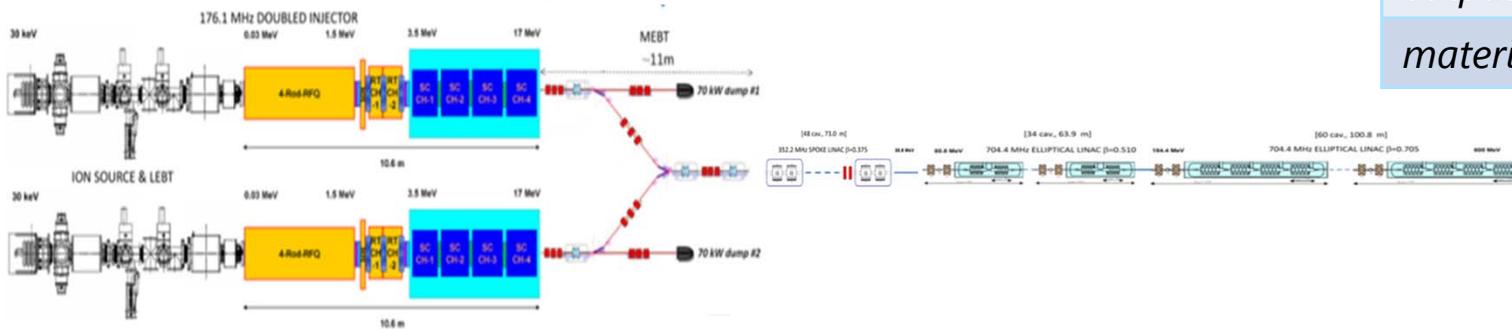


# ADSによる核変換技術の実用化に向けた道筋



# R&D Activities in Belgium : Motivation of MYRRHA

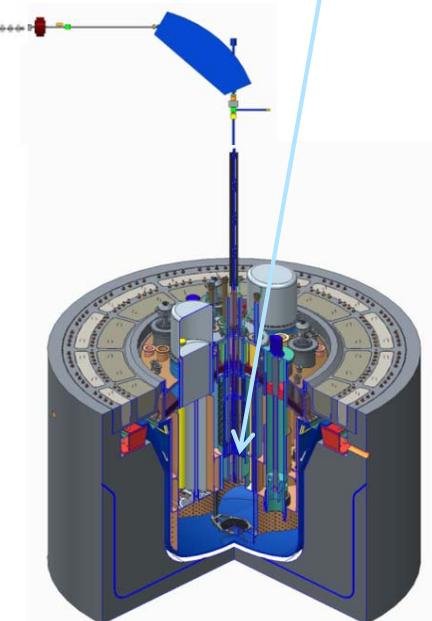
- MYRRHA – An Accelerator Driven System
  - Demonstrate the ADS concept at pre-industrial scale
    - Can operate in critical and sub-critical modes
  - Demonstrate transmutation
  - Fast neutron source → multipurpose and flexible irradiation facility



Target	
<i>main reaction</i>	spallation
<i>output</i>	$2 \cdot 10^{17}$ n/s
<i>material</i>	LBE (coolant)

Accelerator	
<i>particles</i>	protons
<i>beam energy</i>	600 MeV
<i>beam current</i>	2.4 to 4 mA

Reactor	
<i>power</i>	65 to 100 MW <sub>th</sub>
<i>k<sub>eff</sub></i>	0,95
<i>spectrum</i>	fast
<i>coolant</i>	LBE



# Facilities for MYRRHA Program

- LiLiPuTTeR-II
- HELIOS 3
- Heavy Liquid Metal Lab
- MEXICO
- CRAFT
- LIMETS 3
- RHAPTER
- COMPLOT
- ESCAPE
- US lab



LBE conditioning

Materials

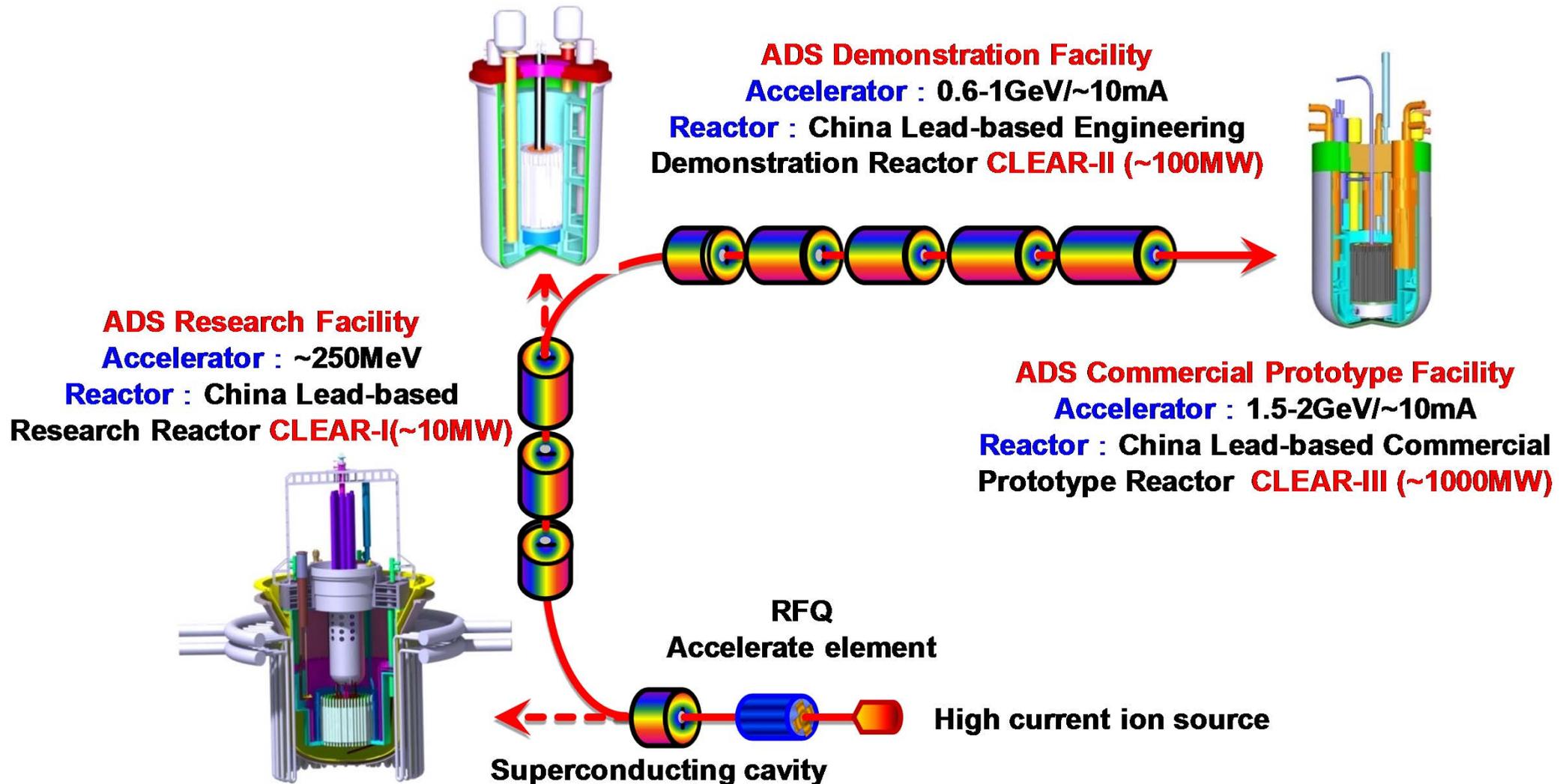
Component testing & TH

Instrumentation

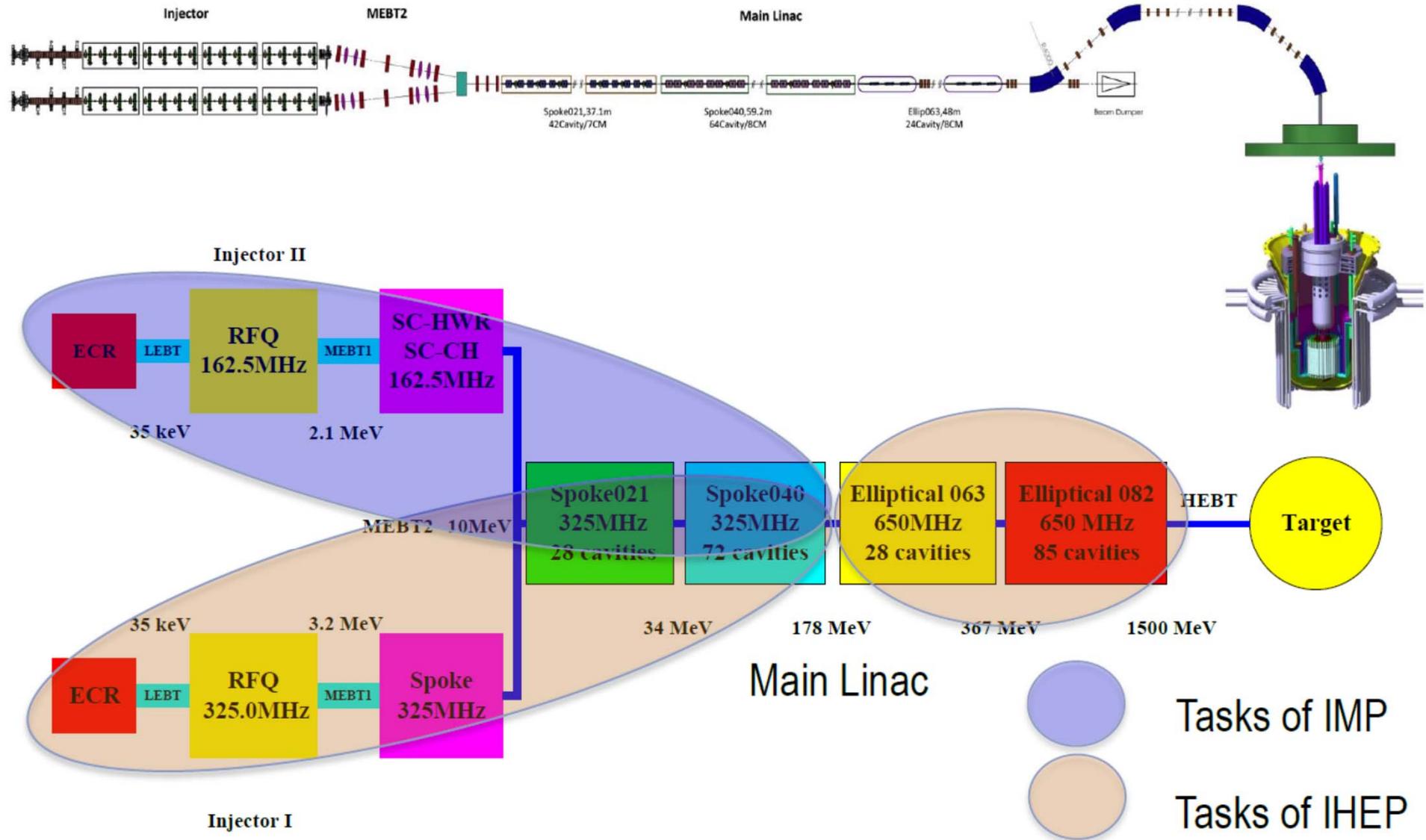
**Green:** operational, **Black:** commissioning

# China Lead-based Reactor Development Plan

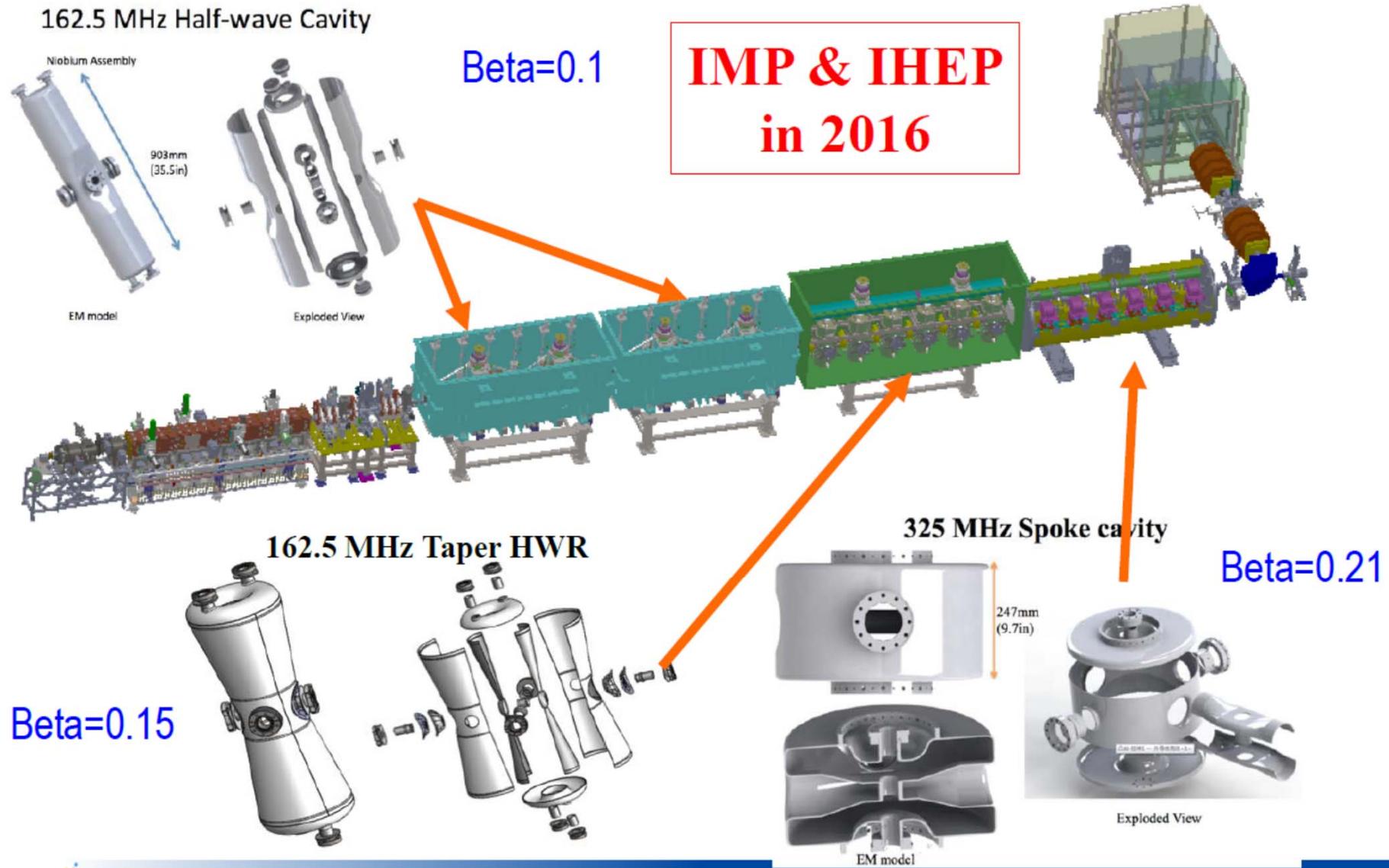
China has launched the ADS engineering construction project in 2011.



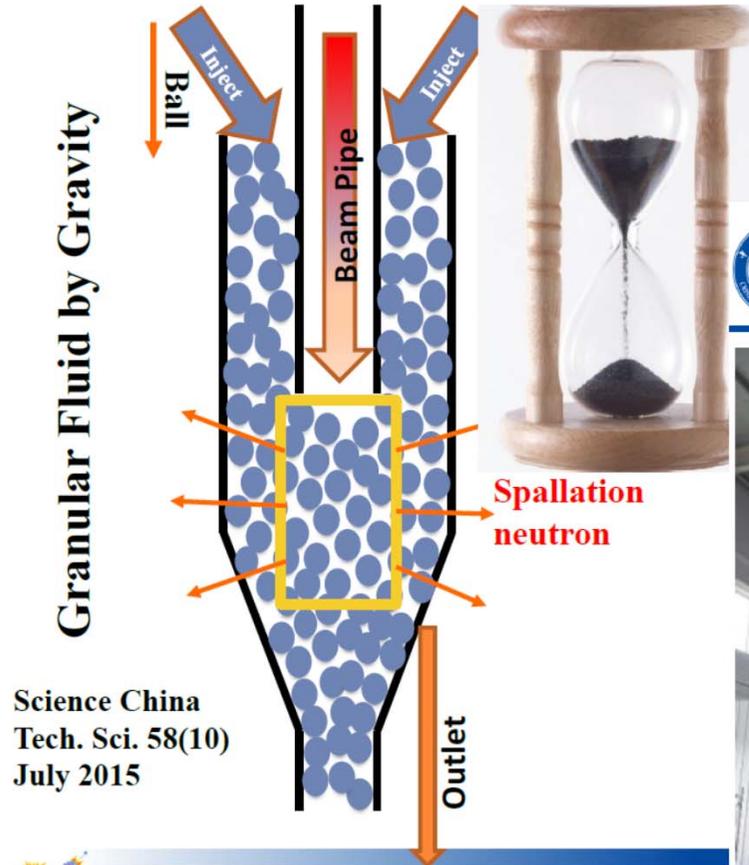
# R&D Activities in China : Configuration of C-ADS



# 25MeV LINAC Commissioning in China



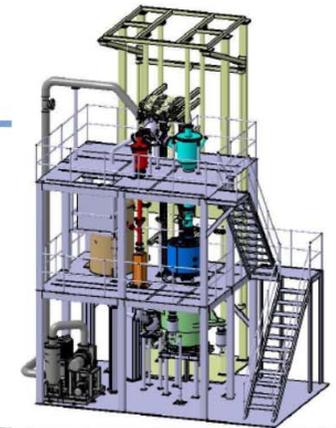
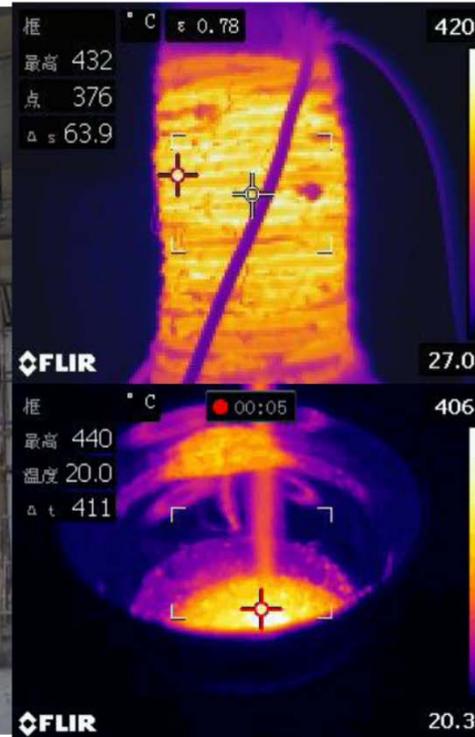
# Granular Spallation Target Development



Science China  
Tech. Sci. 58(10)  
July 2015



## Granular Loop Test

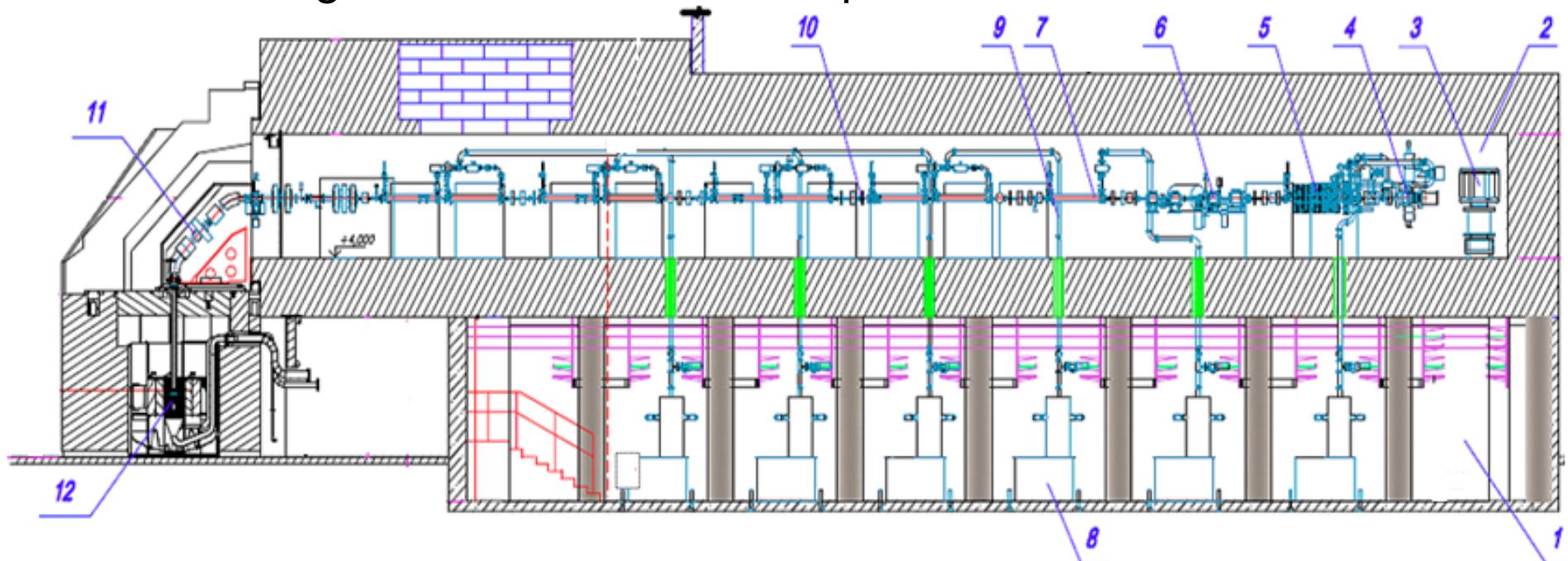


Large scale loop & HT test      Granular target test bench

Y. Bai, TCADS-3, Mito, Japan, Sep. 6-8, 2016

# Ukraine Neutron Source Facility (1/2)

- The facility consists of an accelerator driven subcritical system utilizing low enriched uranium oxide fuel with water coolant, an electron accelerator to generate the neutron source driving the subcritical assembly and the target which has tungsten or natural uranium plates cooled with water.

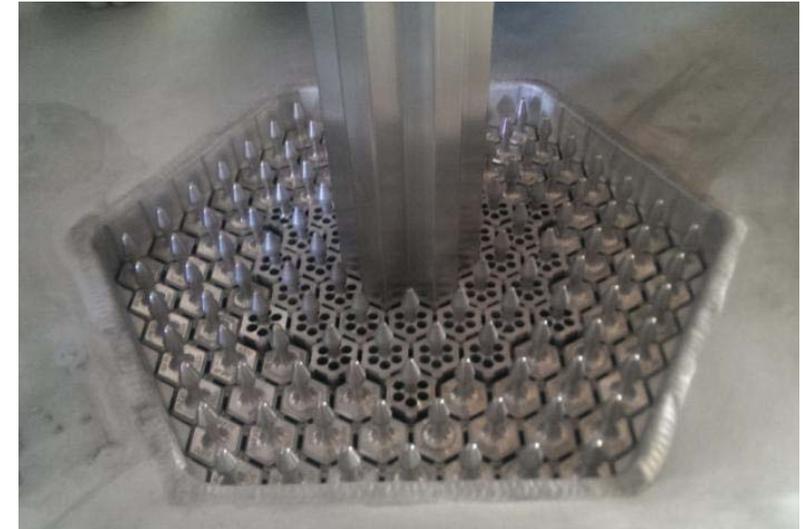


- 1 - klystron gallery, 2 – Accelerator tunnel, 3 - Electron gun power,
- 4 - Electron gun, 5 - First accelerating section, 6 - Energy filter,
- 7 - Accelerating section, 8 - Klystron amplifier, 9 – Waveguide,
- 10 - Quadruple triplet magnet, 11 – Electron Transportation channel, 12 – Subcritical Assembly tank

# Ukraine Neutron Source Facility (1/2)



**Top shield and bending magnet**



**Core configuration with the target assembly**

**Effective neutron multiplication factor, average neutron flux and energy deposition values using 100 kW/100 MeV electron beam**

<i>Target</i>	<i># of FAs</i>	<i>k-eff</i>	<i>Flux along the core (n/cm<sup>2</sup>.s)</i>	<i>Flux along the target (n/cm<sup>2</sup>.s)</i>	<i>Energy Deposited in the target (KW)</i>	<i>Energy Deposited in the core (KW)</i>	<i>Energy Deposited in the reflector (KW)</i>	<i>Total Energy deposition (KW)</i>
<i>W</i>	<i>42*</i>	<i>0.97855 ±0.00012</i>	<i>1.162e+13 ±0.36 %</i>	<i>1.353e+13 ±0.33 %</i>	<i>84.19 ±0.01 %</i>	<i>134.77 ±0.35 %</i>	<i>8.10 ±0.22 %</i>	<i>227.06</i>
<i>U</i>	<i>37</i>	<i>0.97547 ±0.00012</i>	<i>1.965+13 ±0.26 %</i>	<i>2.470e+13 ±0.25 %</i>	<i>88.42 ±0.01 %</i>	<i>196.89 ±0.35 %</i>	<i>11.57 ±0.19 %</i>	<i>296.89</i>

## □ 原子力機構は、**分離変換技術**の研究開発を実施

- 分離変換技術は、**放射性廃棄物の減容・有害度低減**により**地層処分**の負担軽減を目指した技術。
- **加速器駆動システム(ADS)**は、核変換システムの候補概念のひとつ。

## □ **加速器駆動システム(ADS)**を中心とした階層型分離変換システムに関する研究開発の状況

- **ADSやMA核変換サイクル(MA分離、MA燃料製造・再処理)**に関する様々な研究開発を実施中。
- ADSの技術レベルを上げるための次のステップとして、**新たな実験施設(核変換実験施設(TEF))**を検討中。
- **国際協力等**を活用して研究開発を実施。